BAND 31 | SPEKTRUM DER LICHTTECHNIK

PHILIPP ANSORG

# TECHNOLOGISCHE BESCHREIBUNG UND PHYSIOLOGISCHE BEWERTUNG EINES HOCHAUFGELÖSTEN LASERSCANNER-SCHEINWERFERSYSTEMS



KIT Scientific Publishing

Philipp Ansorg

# Technologische Beschreibung und physiologische Bewertung eines hochaufgelösten Laserscanner-Scheinwerfersystems

**SPEKTRUM DER LICHTTECHNIK** **BAND 31**

Lichttechnisches Institut
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

# Technologische Beschreibung und physiologische Bewertung eines hochaufgelösten Laserscanner-Scheinwerfersystems

von
Philipp Ansorg

Scientific
Publishing

Karlsruher Institut für Technologie
Lichttechnisches Institut

Technologische Beschreibung und physiologische Bewertung eines hochaufgelösten Laserscanner-Scheinwerfersystems

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs von der KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) genehmigte Dissertation

von Philipp Ansorg, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 26. Januar 2022
Hauptreferent: Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann
Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. Wilhelm Stork

**Impressum**

KIT Scientific Publishing

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe



www.ksp.kit.edu



Print on Demand 2023 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 2195-1152
ISBN 978-3-7315-1291-2
DOI 10.5445/KSP/1000157034

Für Opi

Ich kann’s bis heute nicht verwinden,
deshalb erzähl ich’s auch nicht gern:
den Stein der Weisen wollt ich finden
und fand nicht mal des Pudels Kern.

**Heinz Ehrhardt**

# ABSTRACT

Modern headlamps include adaptive light functions to improve drivers' comfort and safety at night drives. Even new light source technologies like laserdiodes are established in headlamps, but so far not combined with these dynamic light functionalites. The approach of the laser scanning headlamp, that was developed in the governmental funded research project iLaS, fills this gap. Here, six laser beams are directed on a micro mirror, which oscillates and creates by that an extended light distribution on a white light converter. Besides a comparison to other dynamic headlamp systems, this work gives an overview to the topic of laser safety and classifies the laser scanning module in terms of the international standard as laser class 1 with a nominal ocular hazard distance of around 6 m.

During the development of the laser scanning module the criterion of the homogeneity came up because the six channels of the laser diode were clearly distinguishable. Therefore in this thesis three approaches where developed to evaluate the homogeneity of a luminance distribution. The analysis of a Fourier transformation of the data gives information about the global homogeneity regarding periodic changes in the luminance. By comparing the results with an empiric evaluation function, a light distribution could be classified as homogenious or not. However, the information about local inhomogeneities is missing, so two additional methods are presented. These determine the gradient or the local contrast of the luminance at every point of a light distribution and compare them with the Weber-Fechner-Curve. Whether the local gradient or contrast exceeds the Weber-Fechner-Curve or not, the data pixel could be classified as distinguishable regarding his surrounding and appears as an inhomogeneity and vice versa.

The application of these approaches to classify the criterion of homogeneity to different states of developent of the laser scanning module is presented. The results show a successful use of these methods and could identify different modules as well as other conventional headlamp systems as homogenious or point out inhomogeneities within the luminance distribution.

# KURZFASSUNG

Moderne Scheinwerfersysteme ermöglichen adaptive Lichtfunktionen, um bei Nachtfahrten dem Fahrer eine ideale Ausleuchtung und damit erhöhte Sicherheit zu bieten. Ebenso haben sich Laserdioden als neue Lichtquellen in Scheinwerfern etabliert, allerdings noch nicht in Kombination mit adaptiven Lichtfunktionen. Der Ansatz des Laserscanner-Scheinwerfers, welcher in einem Förderprojekt untersucht und als Prototyp entwickelt wurde, versucht diese funktionale Lücke zu schließen. Hierbei werden sechs Laserdioden auf einen Mikrospiegel gelenkt, welcher durch seine schwingende Bewegung eine ausgedehnte Lichtverteilung auf einem Weißlichtkonverter erzeugt ehe diese auf die Fahrbahn projiziert wird. Neben einem Vergleich dieser Laserscannertechnologie mit anderen dynamischen Scheinwerfersystemen wird in dieser Arbeit das Feld der Lasersicherheit bezüglich Laserlicht im Automobil und im Besonderen des Laserscanners untersucht. Für das vorgestellte Scannersystem ergibt sich demnach ein nomineller Augen-Gefahrenabstand von circa 6 m.

Während der Laserscanner-Entwicklung wurden Prototypen mit deutlich voneinander abgesetzten Laser-Kanälen in der vertikalen Anordnung auf dem Spiegel und folglich auf der Fahrbahn als zu inhomogen bewertet. In dieser Arbeit wurden daher drei Ansätze zur Bestimmung eines Homogenitäts-Kriteriums entwickelt. Die Fourieranalyse von Leuchtdichtedaten ist sensitiv auf periodische Inhomogenitäten innerhalb der gesamten Lichtverteilung und kann mit einer empirischen Bewertungsfunktion verglichen werden, inwiefern ein Mindestmaß an Homogenität erfüllt wird. Um ebenso lokale Inhomogenitäten zu identifizieren, werden die beiden Ansätze der Gradientenanalyse und Kontrastwahrnehmung genutzt. Erstere bestimmt den Leuchtdichte-Gradienten an jedem Punkt der Lichtverteilung, während bei der Methode der Kontrastwahrnehmung lokale Kontraste ermittelt werden. In beiden Fällen werden die bestimmten Leuchtdichteunterschiede mit der Weber-Fechner-Kurve verglichen. Diese gibt eine adaptationsabhängige Schwelle vor, ab welcher ein Leuchtdichteunterschied vom Auge noch wahrgenommen werden kann. Somit kann jeder Punkt einer Lichtverteilung als homogen oder inhomogen klassifiziert werden.

Die vorgestellten Methoden werden zur Bestimmung der Homogenität auf verschiedene Entwicklungsstände des Laserscannersystems angewendet. Die Ergebnisse zeigen, dass Inhomogenitäten sowohl bei unterschiedlichen Laserscanner-Modulen als auch bei konventionellen Scheinwerfersystemen identifiziert werden können.

# DANKSAGUNG

Da ich in den Jahren der Anfertigung dieser Arbeit durch viele tolle Menschen unterstützt und motiviert worden bin, möchte ich mich an dieser Stelle bei einigen davon bedanken.

Als erstes gilt mein Dank meinem Doktorvater Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann, welcher mich nicht nur auf dem Weg dieser Promotion begleitet, sondern vielmehr als seinen Doktorandensohn gesehen hat, was mir viel bedeutet. Dabei waren sein fachlicher Rat und wissenschaftliche Diskussionen ebenso hilfreich wie eindringliche doktorväterliche Worte.

Zudem möchte ich Prof. Dr. rer. nat. Wilhelm Stork danken, dass er sich die Zeit genommen hat, diese Arbeit als Korreferent zu beurteilen und einen Ausflug in die automobile Außenbeleuchtung mit mir zu machen.

Diese Arbeit wurde mir durch die AUDI AG ermöglicht, welche mich als Doktoranden eingestellt hat und mir die Freiheit gab, mich wissenschaftlich mit einer neuen Scheinwerfertechnologie über die alltäglichen Vorentwicklungen und den Spaß im Seriengeschäft hinaus zu beschäftigen. Besonderer Dank gebührt dabei Dr. Wolfgang Huhn und Stephan Berlitz, welche mir nicht nur als Vorgesetzte die Forschung ermöglichten, sondern als Mentoren zeigten, dass auf Konferenzen in der Welt nicht nur in Vortragssälen spannende Dinge zu entdecken sind.

Die Forschung am Laserscannerscheinwerfer wurde unterstützt vom BMBF, dem Bundesministerium für Bildung und Forschung, welches mit dem Förderprojekt iLaS die Zusammenarbeit von Experten verschiedener Firmen und Forschungseinrichtungen ermöglichte. Die Zeit im Konsortium um Osram, Bosch, dem Lichttechnischen Institut des KIT und ZKW mit Audi war eine tolle Zusammenarbeit und eine wertvolle Erfahrung in der Welt der automobilen Lichtentwicklung. Ich möchte meinen damaligen Partnern Mihel Seitz, Dr. Jürgen Hager, Oliver Woisetschläger, Christian Bemmer, Dr. Melanie Helmer und Dr. Patric Jahn herzlich für die gemeinsame Arbeit am Laserscanner danken.

Ein großer Dank gilt meinen Begleitern im beruflichen Alltag während der Promotion, meinen Studenten, Doktoranden, welche in sämtlichen Stadien einer

Doktorarbeit das gleiche durchmachen durften und allen Kollegen, welche mich jeden Tag erneut an der automobilen Lichtentwicklung Spaß haben lassen.

Danke Antje, Johannes und Melli, dass ihr euch als Kontrollleser durch meine Arbeit gekämpft und meine Gedanken nachzuvollziehen versucht habt, was zugegebener Maßen nicht immer ganz einfach ist.

Mein abschließender, aber zugleich bedeutendster Dank gilt meinen Eltern, meinem Bruder, meinen Großeltern und meiner Freundin. Ihr seid der Grund, warum ich es überhaupt soweit schaffen konnte. Ihr habt mir nicht nur das Studium ermöglicht, als Vorbild gedient, die besten Räte für mein Leben gegeben und in schwierigeren Momenten an meiner Seite gestanden, sondern mir auch den notwendigen Tritt in den Hintern verpasst, den ich eindeutig gebraucht habe. Vielen, vielen Dank, dass ihr immer für mich da wart.

# Inhaltsverzeichnis

## KAPITEL 1

# MOTIVATION

Die automobile Beleuchtungstechnik spielt für Fahrten bei Dämmerung und Nacht eine entscheidende Rolle bei der Erfüllung der Fahraufgabe und damit der Sicherheit im nächtlichen Straßenverkehr. Selbst nach der Entwicklung moderner Scheinwerfersysteme und neuer Lichtquellen erfolgt ein Großteil der schweren Verkehrsunfälle während dunkler Tageszeiten, obwohl das Verkehrsaufkommen geringer ist [1, 2, 3]. Das Ziel der Automobilhersteller ist daher die Entwicklung optimierter Lichtsysteme, welche die Umgebung ideal ausleuchten. Dabei soll die Fahraufgabe unterstützt werden, ohne jedoch andere Verkehrsteilnehmer durch Blendung oder Ablenkung negativ zu beeinflussen. Ein häufig genutzter Ansatz dafür sind Scheinwerfersysteme, welche das Lichtbild aus Segmenten zusammensetzen, um Teilbereiche auszublenden oder gezielte Lichtbilder zu erstellen. Diese Superposition von Licht birgt das Risiko von inhomogenen Lichtverteilungen, die für den Fahrer als störend empfunden werden, weil nicht nur Merkmale und Kontraste der Fahrbahn und Umgebung fokussiert werden, sondern auch Artefakte im Lichtbild die Aufmerksamkeit auf sich ziehen.

Laserdioden haben als neue Halbleiter-Lichtquelle Einzug in die automobile Beleuchtung gehalten. Funktional wurden sie zunächst als Zusatzfernlicht eingesetzt, welches die Vorteile von Lasern bezüglich ihrer hohen Leuchtdichte nutzt und gleichzeitig das Risiko der potentiell gefährlichen Strahlungsquelle bewältigen kann. Da für neuartige Lichtfunktionen jedoch dynamische Lichtverteilungen und gleichzeit effiziente Systeme notwendig sind, wurde im Rahmen eines Förderprojektes ein neuer Ansatz eines Laserscheinwerfermoduls erarbeitet und umgesetzt. Das eindimensionale Scannen von mehreren Laserstrahlen ermöglicht die Kombination der Vorteile von Laserquellen und eines variablen Lichtbildes für adaptive Lichtfunktionen.

In dieser Arbeit wird, neben der Vorstellung von Grundlagen der Lasernutzung im Automobil, dieses Laserscannersystem beschrieben und technologisch so-

wie funktional im Vergleich mit weiteren dynamischen Scheinwerfersystemen bewertet. Relevant ist anschließend die Einordnung dieses neuartigen Systems aus Sicht der Lasersicherheit, welcher bei einem Produkt für Endkunden eine besondere Bedeutung zukommt. In der Entwicklungsphase des Laserscanner-Systems wurde deutlich, dass ein zu hoher Kontrast des Weißlichtkonverters zu einer deutlich inhomogenen Lichtverteilung führt. Daher werden Konzepte zur Homogenitätsbewertung vorgestellt, um anhand von Leuchtdichteverteilungen, gemessen oder simuliert im frühen Entwicklungsstadium, das System als akzeptabel oder inhomogen zu klassifizieren. Die Ansätze verfolgen dabei sowohl eine Bewertung der gesamten Lichtverteilung bezüglich periodischer Inhomogenitäten, wie sie bei der Superposition von mehreren identischen Lichtquellen auftreten können, als auch von lokalen Inhomogenitäten.

Die abschließende Anwendung dieser Methoden auf verschiedenen Entwicklungsstadien des Laserscannersystems sowie etablierte Scheinwerfersysteme zeigt die Möglichkeit, Inhomogenitäten zu identifizieren und zu lokalisieren. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Untersuchungen unter Laborbedingungen stattgefunden haben und die Anwendung der Methodik auf den realen Verkehrsraum weiterführender Analysen bedarf.

Kapitel 2

# Grundlagen

## 2.1. Laserlicht im Automobil

Die Halbleiterlasertechnologie als Leuchtquelle erhielt Einzug in automobile Scheinwerfer im Jahr 2013 durch den erstmaligen Einsatz im Audi R18 [4] und BMW i8 [5]. Die Herausforderung bestand auf der einen Seite darin, das Laser-emittierte Licht auf der einen Seite funktional sicher und für den Fahrer als hilfreich für seine Fahraufgabe zu konzipieren. Auf der anderen Seite musste auch die systemseitige Ansteuerung durch die Fahrzeugarchitektur und die Umwandlung in nutzbares Licht realisiert werden.

### 2.1.1. Laser-Weisslichterzeugung

Die Erzeugung von weißem Licht, wie es für den Einsatz als Lichtquelle im Scheinwerfer genutzt werden kann, basiert auf dem Prinzip der Weißlicht-LED. Dabei emittiert ein Halbleiterelement blaues Licht einer Wellenlänge oder zumindest mit einem sehr schmalen Spektrum im blauen Frequenzbereich, wie in Abb. 2.1 beispielhaft gezeigt. Diese Strahlung wird auf einen Konverter gelenkt, welcher neben einem Fluoreszenzfarbstoff auch Streupartikel enthält [6]. Hier wird ein Teil der blauen Strahlung vom Farbstoff absorbiert und breitbandiges Licht emittiert. Da ein Anteil des blauen Lichts nur an den Streupartikeln abgelenkt und nicht absorbiert wird, mischt sich dieses mit dem Stoke-verschobenen Anteil der Strahlung und das gesamte emittierte Licht erscheint weiß.

In Laserscheinwerfern ist die Quelle der blauen Strahlung kein ausgedehnter Oberflächenemitter, welcher Lichtquanten zufällig erzeugt, sondern eine Laserdiode. Diese generiert analog zu LEDs durch Rekombination von Elektronen

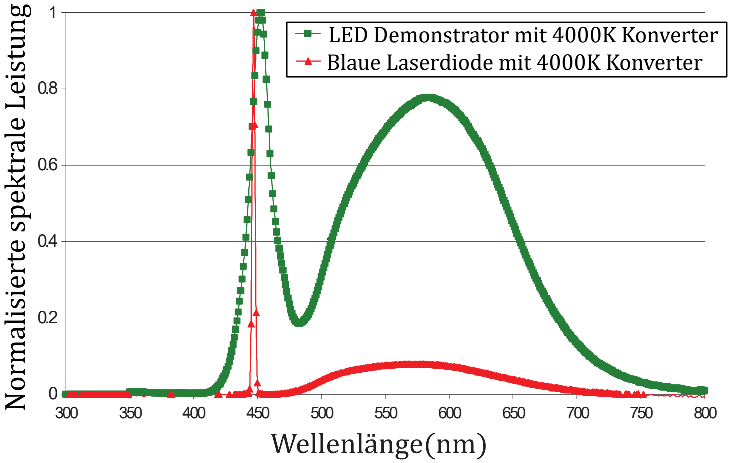



**Abbildung 2.1.:** Normierte Spektren zweier Weißlichtquellen einer Farbtemperatur von 4000 K. Konvertieres Blaulicht einer LED (grün) und Laserdiode (rot). Deutlich zu erkennen ist der schmalbandigere blaue Anteil der Strahlung einer Laserlichtquelle im Vergleich zur LED-Quelle. Modifiziert, aus [7]

und Löchern im Halbleiter blaues Licht. Jedoch wird die Emission durch das Reflektieren von vorhandenen Lichtquanten innerhalb des Kristalls stimuliert [8]. Dadurch hat das emittierte Licht einer Laserdiode die typischen Eigenschaften eines Lasers wie ein schmalbandiges Spektrum, große Kohärenzlänge oder eine starke Bündelung des Strahls.

Die Kombination aus einer Lichtquelle mit kleiner Austrittsfläche und dennoch sehr hoher Leuchtdichte im Vergleich zu einer LED bietet für den Einsatz von Laserlicht im Scheinwerfer mehrere Vorteile [9, 10, 11].

- Die hohe Leuchtdichte ermöglicht es durch eine entsprechende optische Auslegung der Scheinwerferoptik das Licht weiterhin stark gebündelt auf die Fahrbahn zu projizieren. Damit lassen sich große Erkennbarkeitsweiten durch laserbasierte Lichtfunktionen realisieren.
- Die nur kleine Leuchtfläche einer Laserweißlichtquelle im Scheinwerfer bietet die Möglichkeit, aufgrund der damit einhergehenden kleinen Etendue, kompakte Linsen- oder Reflektorsysteme zu nutzen, um einen großen

Anteil des Lichtstroms als nutzbares Licht in die Straßenszenerie zu bringen. Laserbasierte Weißlichtquellen eignen sich daher auch für die Beleuchtung von abbildenden Scheinwerfertechnologien wie LCD-, DMD- oder LCoS-Systemen.

- Für die Entwicklung der Designsprache von Scheinwerfern sind Lasermodule und deren kleinen Optiken eine Lösung, da der Trend von Scheinwerferdesigns zu immer kleineren Gesamtaustrittsflächen tendiert.
- Ein wirtschaftlicher Aspekt ist nicht zu vernachlässigen. Durch die Digitalisierung der Unterhaltungsindustrie (Streaming-Dienste von Filmen und Videos) ist die Nachfrage von Laser-basierten Wiedergabemedien (DVD & BlueRay) gesunken und die Produktionsanlagen der Laserdioden-Hersteller nicht mehr ausgelastet. Die Eröffnung des neuen Automotive-Industriezweigs stellt damit den mittelfristigen Erhalt der Laserdioden-Wertschöpfung sicher.

### 2.1.2. Laser-Fernlichtspot

Analog zur Einführung der LED-Technologie in der automobilen Beleuchtung gibt es zwei Wege, wie sich eine neue Technologie etablieren kann. Dies geschieht zum einen über ein Design, welches in dieser Form nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand durch vorhandene Technologien dargestellt werden kann. Zum anderen muss eine innovative Lichttechnologie vorhandene Lichtfunktionen verbessern oder neue Lichtfunktionen ermöglichen.

Die neu entwickelte Lichtfunktion im Zusammenhang mit der Einführung von Laserlichtquellen im Scheinwerfer war das Laser-Zusatzfernlicht oder auch Fernlicht-Spot. Die hohe Leuchtdichte der Lichtquelle wird hier genutzt, um eine hohe Beleuchtungsstärke in das Fernfeld zu projizieren.

In Abb. 2.2 sind Leuchtdichteaufnahmen gezeigt, die den Unterschied des Fernlichts zu einem Fernlicht mit Laser verdeutlichen. Durch die Erhöhung der Lichtstärke im zentralen Sichtbereich des Fahrers können im Vergleich zum LED-Fernlicht noch entferntere Objekte erkannt werden, insofern diese eine

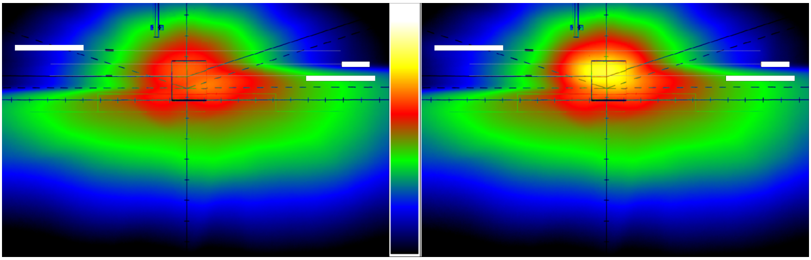


**Abbildung 2.2.:** Leuchtdichtebilder eines Fernlichts (links) und Fernlicht mit Laserspot (rechts) in Falschfarbendarstellung. Beide Aufnahmen sind auf die gleichen Grenzen logarithmisch skaliert von 0,1 $\frac{cd}{m^2}$ bis 1000 $\frac{cd}{m^2}$. Legende zwischen den Leuchtdichteverteilungen. Modifiziert, aus [13]

Reflexion aufweisen, die das ausgestrahlte Licht in das Auge des Fahrers zurückwerfen. Somit kann die Reichweite und die Erkennbarkeitsentfernung durch den Laser-Fernlichtspot erhöht werden, was einer Sicherheitserhöhung entspricht.

Explizit wurde dieser Sicherheitsgewinn durch KOBBERT et al. und UCHIDA et al. für den Laser-Fernlichtspot untersucht [12, 9]. So ergibt sich mit einem Zusatzfernlichtspot in einer Realfahrtstudie für eine 95 %ige Sichtbarkeits- und Erkennungsgrenze nahezu eine Doppelung der Entfernung [12]. In der Studie von UCHIDA et al. resultiert eine Verbesserung der Erkennbarkeitsentfernung nahezu um den Faktor 1,5 [9]. Zusätzlich wurde hier auch der Einfluss der Lichtaustrittsfläche im Scheinwerfer als Störgröße für entgegenkommende Verkehrsteilnehmer untersucht. Die Annahme, dass kleinere Leuchtflächen bei entsprechend höherer Leuchtdichte eine stärkere Blendung hervorrufen, konnte widerlegt werden.

Auch wenn die Blendung nach UCHIDA von Laser-Fernlichtreflektoren kein Problem für den Einsatz von Laserlichtquellen in Scheinwerfern darstellt, so ist dadurch nicht gewährleistet, dass diese Lichtquelle augensicher ist. Hintergrund hierfür ist der Einsatz von Laserdioden der Laserschutzklasse 4. Nur diese liefern die notwendige Strahlungsleistung um eine Scheinwerfer-Lichtfunktion wie den Fernlichtspot zu realisieren. Daher müssen für den Laser-Fernlichtspot weitere bauliche sowie funktionale Sicherheitsmechanismen entwickelt und eingesetzt werden [14].

Funktional ist der Laser-Fernlichtspot mit dem Fernlichtassistenten gekoppelt. Dieser erkennt entgegenkommende und vorausfahrende Verkehrsteilnehmer und deaktiviert das gesamte Fernlicht inklusive der Laserlichtquelle. Damit ist sichergestellt, dass selbst bei direktem Austritt von blauer Laserstrahlung kein Verkehrsteilnehmer dieser potentiell gefährlichen Strahlung ausgesetzt wird.

Für eine detailliertere Betrachtung der Lasersicherheit im Automobil sei auf Abschnitt 2.1.3 verwiesen. Die Nutzung des Laserlichts ist also an die Aktivierung des Fernlichts gebunden. Um den Nutzungsgrad zu erhöhen muss die Laserlichtquelle mit weiteren Ansätzen von intelligenten Lichtfunktionen kombiniert werden.

Parallel zur Integration von Laserlichtquellen in Scheinwerfer wurde im Jahr 2013 erstmals die Matrix LED Technologie in einem Serienfahrzeug verbaut [15]. Hierbei ist das Fernlicht in Segmente unterteilt, welche durch Ansteuerung einzelner LEDs adaptiv aktiviert oder deaktiviert werden. In Verbindung mit einer Kamera ist die Umsetzung eines blendfreien Fernlichts möglich [16]. Ein Ansatz, um diese Form der intelligenten Lichtfunktion mit den Vorteilen einer Laserlichtquelle zu kombinieren, ist das scannende Lasersystem, auf welches in Abschnitt 3.1 eingegangen wird.

### 2.1.3. LASERSICHERHEIT

Laserlicht kann aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften potentiell gefährlich für den Menschen sein. Aufgrund der typischerweise hohen Energiedichte und des gleichzeitig kleinem Strahldurchmessers, welcher bei typischen Abständen zwischen Mensch und Laserquelle nicht signifikant zunimmt, besteht die Möglichkeit eines hohen Energieeintritts von Laserlicht in das menschliche Auge oder die Haut [17]. Dabei kann es sowohl zu photochemischen (Wechselwirkungen der Netzhaut- und Hautzellen bei niederenergetischer Langzeitbestrahlung) als auch thermischen Schäden (Verbrennungen und Absorption von Zellen) kommen [18]. Für die Anwendung von Laserlichtquellen im Fahrzeug muss daher die Einhaltung der Lasersicherheit gewährleistet werden.

In den ECE-Regelungen[1] gibt es für den Einsatz von Laserlichtquellen im Scheinwerfer keine gesetzlichen Vorschriften. Der Scheinwerfer und als Endprodukt das Fahrzeug ist jedoch ein Laserprodukt, welches den Anforderung der IEC 60825-1:2014 (folgend auch „Lasernorm" genannt) genügen muss [20]. Die deutsche Übersetzung der DIN 60825-1:2014 ist dabei inhaltlich identisch mit der jeweiligen internationalen Version der IEC 60825-1. Besonderheiten gibt es für die USA und China.

Die FDA (U.S. Food and Drug Administration) erteilt eine Importerlaubnis von Laserprodukten nur unter Einhaltung der Anforderungen der **FDA Laser Notice No. 50** [21]. Hierbei sind neben einer ausführlichen Dokumentation auch die Konformität des Laserprodukts mit der IEC 60825-1:2007 notwendig [22]. Für den Verbau eines weißkonvertiertem Lasers findet das **IECEE CTL Provisional Decision Sheet PDSH 1028** ebenso Anwendung. Dieses fordert, dass der nicht-konvertierte blaue Anteil der Strahlung nach der Lasernorm IEC 60825-1:2007 zu klassifizieren ist, während der konvertierte Anteil nach der Norm IEC 62471:2006 (Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen, folgend „Lampennorm") zu bewerten ist [23].

In China gilt der nationale GB-Standard (*Guójiā Biāozhǔn*: Nationaler Standard) **GB 7247.1-2012**, welcher inhaltlich mit der IEC 60825-1:2007 übereinstimmt [24].

Normen werden durch Experten aus verschiedensten Fachrichtungen regelmäßig diskutiert und wenn nötig dem neusten Stand der Technik entsprechend aktualisiert. So auch bei der Lasernorm, welche durch die ICNIRP Scientific Expert Group (**I**nternational **C**ommission on **N**on-**I**onizing **R**adiation **P**rotection) 2014 von der seit 2007 geltenden Edition 2 auf die 3. Edition aktualisiert wurde.

Neben der Anpassung maximal zulässiger Bestrahlungsgrenzen für die einzelnen Laserschutzklassen ist vor allem ein neuer Absatz für den Einsatz von Lasern in Scheinwerfern relevant, das Kapitel *4.4 Lasereinrichtungen, die als konventionelle Lampen eingesetzt werden sollen*. Unter bestimmten Voraussetzungen darf ein Laserprodukt, wie beispielsweise ein Scheinwerfer, als ungefährliches Produkt der Laserschutzklasse 1 (LSK 1) gelten.

[1] Korrekter Weise sind dies die dem *Übereinkommen über die Annahme einheitlicher technischer Vorschriften für Radfahrzeuge, Ausrüstungsgegenstände und Teile, die in Radfahrzeuge(n) eingebaut und/oder verwendet werden können, und die Bedingungen für die gegenseitige Anerkennung von Genehmigungen, die nach diesen Vorschriften erteilt wurden angeschlossenen Regelungen* aus [19]. Für die bessere Lesbarkeit wird die in der Automobilindustrie geläufigere Bezeichnung „ECE-Regelungen" gewählt.

Hier tritt keine Laserstrahlung im Sinne seiner physikalischen Eigenschaften aus, sondern eine breitbandige, ausgedehnte Strahlung. Diese konvertierte Strahlung ist dann nach der Lampennorm zu klassifizieren. Hier gelten ähnliche Grenzwerte für die Bestrahlung von Haut und Augen, welche Grundlage für die Einstufung der Lichtquellen in Risikogruppen ist. Jedoch ist das Inverkehrbringen solcher Produkte nach Lampennorm einfacher, da beispielsweise keine geschlossenen Laserschutzräume oder ein bestellter Laserschutzbeauftragter notwendig sind, ehe eine solche Lichtquelle aktiviert werden darf. In detaillierten Erklärungen zu diesem neuen Kapitel der Lasernorm werden Scheinwerfer explizit als Beispielprodukt genannt, für welches diese Einstufung nach der Laser- und Lampennorm gelten soll [25, 26].

Für Hersteller von Fahrzeugen mit Laserscheinwerfern liegt allerdings in dieser Interpretation von Laserlichtquellen nach Stand der Technik die Herausforderung beim Export in internationale Märkte. Wie oben beschrieben gelten in den USA und in China nationale Standards. Diese orientieren sich zwar inhaltlich an der Lasernorm, reagieren jedoch nur mit Verzögerungen auf Aktualisierungen von IEC-Normen, sodass noch heute die zweite Edition der Lasernorm gilt, welche den Passus von Lasern als Lampe nicht beinhaltet. Die Folge ist eine länderspezifische Einstufung der Laserschutzklasse und differenzierte Kennzeichnung, obwohl das Produkt global identisch ist und von ihm nur durch die verschiedenen anzuwendenden Normen vermeintlich unterschiedliche Gefahr ausgeht. Auf das System des Laserscannerscheinwerfers trifft die Verwendung von Lasern als Lampensystem ebenso zu, da eine Weißlichtkonvertierung stattfindet und somit unter Normalbedingungen kein Laserlicht austreten kann.

Auch wenn Lasermodule im Scheinwerfer ein Lampenersatz sind, so sind sich Automobilhersteller der potentiellen Gefahr von Laserquellen im Scheinwerfer bewusst, weswegen weitere Sicherheitsmechanismen entwickelt wurden, um eine Schädigung von Menschen und Tieren durch Laserlicht aus Scheinwerfern zu verhindern [14, 27]. Durch die Wertschöpfungskette beim Einsatz von Lasern als automobile Lichtquelle, aber auch um einen maximalen Grad von Lasersicherheit zu gewährleisten, wurden Sicherheitskonzepte auf Lasermodul-, Scheinwerfer- und Funktionsebene entwickelt, wie in Abb. 2.3 dargestellt.

Der Strahlengang automobiler Lasermodule, von der Laserdiode bis zum Konverter, muss strahlungsdicht eingehaust werden, damit nur konvertiertes Licht

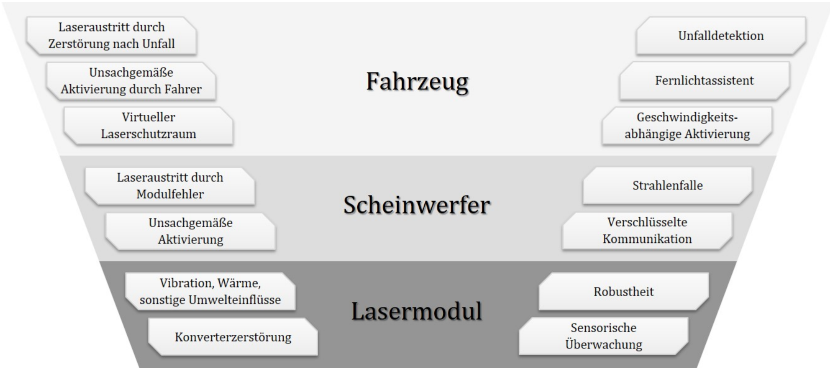



**Abbildung 2.3.:** V-Modell der potentiellen Gefährdungsursachen und Vermeidungsstrategien durch Austritt von Laserstrahlung auf verschiedenen Systemebenen

austreten kann. Diese Einhausung muss Robustheitsanforderungen aus dem Automotivebereich gegenüber Vibrationen, Stößen, natürlicher Hitze und Kälte sowie Korossion erfüllen. Um dennoch auch bei einem Verkehrsunfall die Lasersicherheit zu gewährleisten, ist die Aktivierung des Lasers im Scheinwerfer an das fahrzeuginterne Crashsignal gekoppelt und wird bei Auslösen des Airbags sofort verhindert. Da das robuste Gehäuse lediglich an der Stelle des Konverters Strahlung emittieren kann, ist hier auch die größte Gefahrenquelle verortet. Im Fall, dass der Konverter defekt, zerstört oder entfernt wurde, tritt unkovertiertes und ungestreutes Laserlicht aus. Daher gibt es auf Modulebene eine sensorische Überwachung des Konverters.

Ein Ansatz besteht darin, eine erfolgreiche Konvertierung durch photometrische Strahlungsmessung vor und hinter dem Konverter zu bestimmen, wobei der Anteil an blauer und konvertierter Strahlung in definiertem Verhältnis vorliegen muss [27]. Alternativ ist auch eine direkte Überwachung des Konverters möglich, indem eine bestromte metallische Struktur aufgebracht ist, welche ihren spezifischen Widerstand ändert, sollte der Konverter eine Rissbildung aufweisen [28]. Da die Konverter keramische Werkstoffe sind, werden sich strukturelle Defekte durch die Energieminimierung dieser Imperfektion stets zum Rand des Konverters ausbreiten und dort einen Riss entstehen lassen [29, Kap.4]. Damit kann kein Loch im Strahlengang des Lasers auftreten, ohne dass das Überwa-

chungssystem dies detektiert. Der Vorteil von diesem Ansatz ist, dass auch im abgeschalteten Zustand der Laserdiode eine Überwachung des Konverters durchgeführt werden kann.

Um eine redundante Absicherung zu realisieren, wird auf Scheinwerferebene eine Strahlenfalle konstruiert. Das Weißlicht tritt nicht direkt aus dem Scheinwerfer aus, sondern wird durch einen Reflektor geformt und anschließend auf die Fahrbahn projiziert. In diesem Reflektor kann in der optischen Achse, in welcher der Laserstrahl ohne Konverter liegen würde, eine Strahlenfalle konstruiert werden, welche unkonvertiertes Laserlicht daran hindert den Scheinwerfer zu verlassen und eine Gefahr darzustellen.

Neben intrisischen Fehlern muss auch eine unsachgemäße Aktivierung durch den Menschen verhindert werden. Daher ist es nicht ausreichend das Modul mit Spannung zu versorgen, um den Laser zu aktivieren, sondern ein verschlüsseltes Signal muss korrekt auf Fahrzeugkommunikationsebene übermittelt werden.

Zudem ist das Laserlicht nicht direkt durch den Fahrer aktivierbar. Das Laserlicht wird nur durch die Funktion des Fernlichtassistenten aktiviert. Die Kamerasensorik, welche den Verkehrsraum vor dem Fahrzeug überwacht, meldet erkannte Objekte. Auf Steuergerät-Ebene wird die Freigabe zur Aktivierung des Laserfernlichts in Richtung Scheinwerfer softwareseitig nur dann erteilt, wenn kein Objekt vor dem Fahrzeug erkannt wurde.

Zusätzlich muss eine Mindestgeschwindigkeit von 70 $\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$ erreicht werden. Damit wird eine Aktivierung in Ortschaften verhindert, aber auch ein virtueller Laserschutzraum vor dem Fahrzeug generiert, welcher durch Personen nicht betreten werden kann ohne sich in größere Gefahr zu begeben als durch Laserlicht im Schlimmstfall anzunehmen ist [27].

### 2.1.4. RESTKOHÄRENZ VON WEISSKONVERTIERTEM LASERLICHT

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, wird die neueste Lasernorm nicht in allen Ländern akzeptiert, wodurch auch das konvertierte Weißlicht aus Laserscheinwerfern als Laserstrahlung behandelt und klassifiziert werden muss. Es

stellt sich die Frage, inwieweit das aus Scheinwerfer-Lasermodulen emittierte Licht noch Eigenschaften eines Lasers hat.

Der hohe Grad an Kohärenz zeichnet Laserlicht im Vergleich zu konventionellen Lichtquellen aus. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit die zeitliche Kohärenz von einem Laserscheinwerfer und des Laserscanner-Systems untersucht. Die ausführliche Beschreibung des Versuchs und der Ergebnisse ist in [30, 31] zu finden, welche im Zuge dieser Promotion entstanden und folgend zusammengefasst werden sollen.

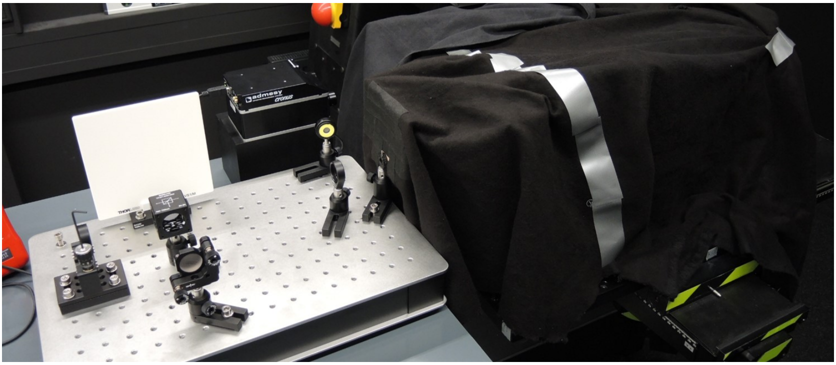


**Abbildung 2.4.:** Aufbau der Kohärenzmessung mit Michelson-Interferometer auf der linken Seite. Der Scheinwerfer wurde abgedeckt und nur ein definierter Strahl vermessen. Hierzu wurde mit einem Goniometer die Position der maximalen Strahlintensität angefahren. Modifiziert, aus [31]

Während die räumliche Kohärenz die Korrelation der elektrischen Feldstärke an zwei Orten zur gleichen Zeit beschreibt, gibt die zeitliche Kohärenz Aufschluss über die Charakteristik am gleichen Ort zu verschiedenen Zeitpunkten.

Die zeitliche Kohärenz kann mit Hilfe eines Michelson-Interferometers gemessen werden. Für die Charakterisierung von Scheinwerferlicht kann dies mit vertretbarem Aufwand umgesetzt werden. Der Ansatz des Michelson-Interferometers erlaubt eine Untersuchung der konstruktiven und destruktiven Interferenz von einer aufgeteilten Lichtwelle. Dabei legen die geteilten Strahlen unterschiedliche Weglängen zurück, bevor sie wieder kombiniert werden und ihre Wechselwirkung in Form eines Interferenzmusters beobachtbar wird.

Da reales Laserlicht nicht perfekt monochromatisch ist und die Strahlung unterschiedlicher Wellenlängen miteinander wechselwirkt, nimmt die Fähigkeit zur konstruktiven Interferenz mit zunehmendem zeitlichen Versatz der kombinierten Strahlen ab. Dieser Kontrast des Interferenzmusters kann für verschiedene Weglängen und damit zeitlichem Versatz der Strahlen im Michelson-Interferometer gemessen werden. Der Abstand, bei welchem die Kontrastfunktion auf einen bestimmten Wert abgefallen ist, nennt man Kohärenzlänge $l_c$. Für typische Lichtquellen sowie einen Laserscheinwerfer und den Laserscanner sind die Kohärenzlängen in Tabelle 2.1 gelistet.

Die Zuordnung des konvertierten Lichts von Scheinwerfersystemen zu Kohärenzlängen von Lasern oder LEDs ist nicht eindeutig möglich. Der Vergleich gestaltet sich auch daher schwierig, weil zur Bestimmung der Kohärenzlänge aus der Kontrastfunktion verschiedene Grenzen von 0,5 ; $\frac{1}{e}$ ; $\frac{1}{e^2}$ oder 0 genutzt werden. Der Vergleich der Kohärenzlänge von weißkonvertierenden Lasersystemen im Scheinwerfer zur Argumentation der Verwendung als Lampenersatz ist daher kritisch zu bewerten und kann nur ein Anhaltspunkt sein. Die Betrachtung der zeitlichen Kohärenz eines Laserscannersystems reicht daher für die Charakterisierung bezüglich der Lasersicherheit nicht aus.

| Lichtquelle | $\lambda_0$ [nm] | $\Delta\lambda$ [nm] | $l_c$ |
|---|---|---|---|
| Sonne | 550 | 300 | 900 nm |
| Glühlampe | 550 | 300 | 1 µm |
| LED | 660 | 25 | 17 µm |
| Laserdiode ohne Stabilisierung | variabel | variabel | $<$1 mm |
| Laserdiode mit Stabilisierung | 760 | 38 | 15 mm |
| HeNe-Laser mit Stabilisierung | 632,8 | $1 \times 10^{-6}$ | $\leq$400 m |
| Laserscheinwerfer | 440 | 5,16 | 92,5 µm |
| Laserscanner | 454 | 4,60 | 147,0 µm |

**Tabelle 2.1.:** Typische Wellenlängen $\lambda_0$, Bandbreiten $\Delta\lambda$ und Kohärenzlängen $l_c$ von verschiedenen Lichtquellen und den untersuchten Scheinwerfersystemen. Werte aus [32, 33, 34, 30]

## 2.2. Visuelle Wahrnehmung projizierten Lichts

### 2.2.1. Kontrast

Die Wahrnehmung unserer Umgebung mit dem Sehsinn beruht auf mehreren Grundfunktionen, die durch das Zusammenspiel des Auges und des damit verbundenem Nervensystem umgesetzt werden [35, 36]. Diese Grundfunktionen sind Lichtempfindlichkeit, Sehschärfe, Wahrnehmungsgeschwindigkeit, Farbempfindung und insbesondere Kontrastempfindung. Letztere gibt Auskunft darüber, ob sich zwei Flächen aufgrund ihrer Leuchtdichtedifferenz mit dem menschlichen Auge unterscheiden lassen.

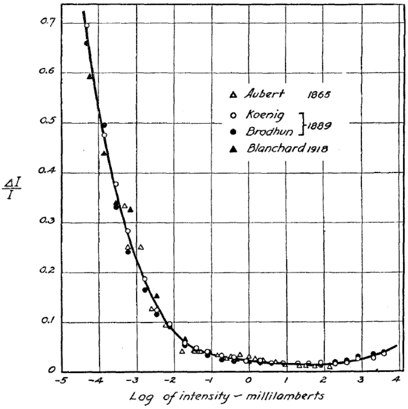
WEBER postulierte im Jahr 1834, dass die Wahrnehmung des Menschen relativ zu einem Grundreiz ist [37]. Damit lässt sich der sogenannte Weber-Kontrast $K_{\mathrm{W}}$ definieren zu:

$$K_{\mathrm{W}} = \frac{L_{\mathrm{O}} - L_{\mathrm{U}}}{L_{\mathrm{U}}} = \frac{\Delta L}{L_{\mathrm{U}}}. \tag{2.1}$$

Hierbei ist $L_{\mathrm{O}}$ die Leuchtdichte des zu erkennenden Objekts und $L_{\mathrm{U}}$ die Umgebungsleuchtdichte, welche als Grundreiz dient. Ein Objekt lässt sich dann vor einer Umgebung $L_{\mathrm{U}}$ erkennen, wenn der Schwellenkontrast $K_{\mathrm{S}}$ überschritten wird.

Der Schwellenkontrast muss größer sein als die Empfindlichkeit eines beliebigen Sinnes, in diesem Falle des Sehens, um wahrgenommen zu werden. Diese Empfindlichkeit ist jedoch nicht über den gesamten Wahrnehmungsbereich konstant, sondern von der Reizart und -stärke abhängig [38, 39].

Dies bedeutet für die Anwendung auf die Kontrastwahrnehmung, dass $K_{\mathrm{W}}$ eine Funktion der Adaptionsleuchtdichte auf die Umgebung $L_{\mathrm{U}}$ ist [40]. In Abb. 2.5 ist diese Abhängigkeit dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass insbesondere bei kleinen Leuchtdichten größere relative Unterschiede notwendig sind, um einen Kontrast wahrzunehmen.



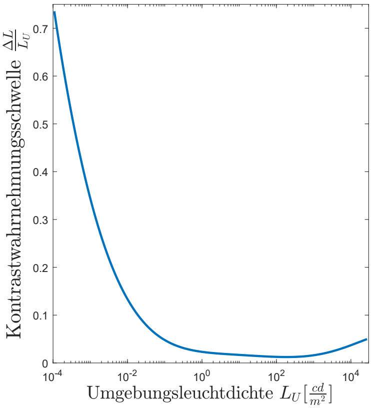




**Abbildung 2.5.:** Die Weber-Fechner-Kurve zeigt, dass der Schwellenkontrast, ab dem ein Leuchtdichteunterschied wahrgenommen werden kann, nicht über alle Helligkeitsbereiche konstant ist. **Links**: Weber-Fechner-Kurve aus [38], die durch mehrere unabhängige Untersuchungen bestätigt wurde. **Rechts**: Geglättete Weber-Fechner-Kurve umgerechnet in die heute gebräuchliche Einheit $\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$.

### 2.2.2. HOMOGENITÄT

Der Begriff Homogenität stammt vom griechischem Wort *homós*, **gleich** ab und beschreibt die Gleichmäßigkeit einer Eigenschaft bezogen auf ein System mehrerer Elemente. In der Lichttechnik ist dieses System eine Fläche und deren Eigenschaft die Leuchtdichte oder andere lichttechnische Größen. Die Homogenität von leuchtenden oder beleuchteten Flächen wurde in verschiedenen Ansätzen beschrieben [41, 42, 43, 44, 45, 46, 47]. Es muss hierbei unterschieden werden, ob ein rein objektiver Vergleich der Messgrößen der Leuchtdichte von verschiedenen Bereichen einer Fläche durchgeführt wird oder die Disziplin der Psychophysik einbezogen wird.

Werden nur Einzelpunkte vermessen, wie im älteren Messstandards für Flachbildschirme [48] oder mittlere Leuchtdichten ausgedehnter Bereiche zur Berechnung von Gleichmäßigkeiten innerhalb einer Displaylichtverteilung genutzt [41], so ist es möglich, dass lokale Inhomogenitäten nicht erkannt werden. Da-

her wurden Verfahren entwickelt, welche sichtbare Ungleichmäßigkeiten, so genannte Mura (japan. **Makel**), detektieren und klassifizieren können [49].

Die Psychophysik beschäftigt sich mit dem nicht-messbaren Anteil der Wahrnehmung. So sind Mustererkennung, optische Täuschung, Adaption und insbesondere die Schwellenwahrnehmung Effekte, welche nicht bei objektiven Messmethoden als Ergebnis resultieren und nur durch Einbeziehen physiologischer und psychologischer Prozesse plausibilisiert werden oder durch Studien beschrieben werden können [50, 42, 51].

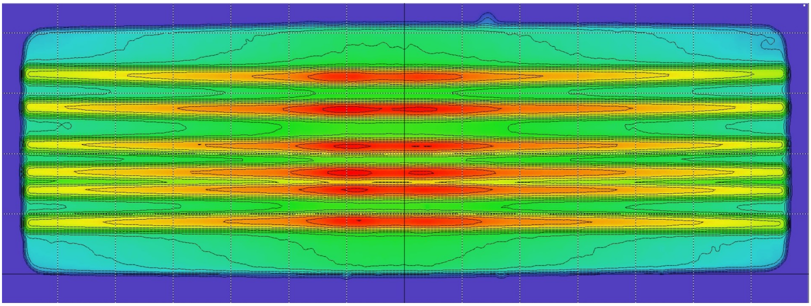


**Abbildung 2.6.:** Falschfarbendarstellung der Lichtverteilung eines Laserscannermoduls der frühen Entwicklungsphase. Die Falschfarben entsprechen der logarithmischen Lichtstärke von 11,5 cd bis 47 300 cd. Deutlich zu erkennen sind die 6 Laser-Einzelkanäle, welche in der Form als Fernlichtverteilung nicht akzeptabel sind.

Inhomogenitäten in Scheinwerferlichtverteilungen sind eine Störgröße für den Fahrer. Insbesondere hochaufgelöste Scheinwerfersysteme sind anfällig für die Ausprägung von Inhomogenitäten aufgrund ihrer Superposition von Lichtsegmenten zur Ausbildung der gesamten Lichtverteilung. Für das in Abschnitt 3.1 beschriebene Laserscannersystem können Inhomogenitäten vor allem durch die Positionierung der einzelnen Laserkanäle auf dem Konverter und die Abstrahlcharakteristik des Konverters hervorgerufen werden. In Abb. 2.6 ist die Leuchtdichteverteilung eines Laserscannermoduls in der frühen Entwicklungsphase gezeigt. Die einzelnen Kanäle sind deutlich zu erkennen und führen auf der Fahrbahn zu einer Ablenkung und einem Diskomfort für den Fahrer.

Ziel dieser Arbeit ist es daher eine Methodik zur Klassifikation zu entwickeln, ob die Homogenität einer Lichtverteilung verschiedener Entwicklungsstände des

Laserscanners ausreichend gegeben ist. Die Vorgabe ist dann erfüllt, wenn durch das menschliche Auge keine lokalen Kontraste mehr erkannt werden können.

# Kapitel 3

# Technologische Beschreibung eines Laserscannersystems

## 3.1. Laserscanner-Scheinwerfer

Bereits 1938 wurde von Monroe vorgeschlagen, eine Scheinwerferlichtverteilung durch oszillierende Bewegungen dynamisch zu gestalten. Hier sollte durch einen vom Fahrer gesteuerten Motor der gesamte Reflektor eines Scheinwerfers vertikal oder horizontal bewegt werden. Ziel war es, die Ausleuchtung der Straße zu verbessern, indem auch der Fahrbahnrand und die Seitenstreifen vom Lichtkegel beleuchtet werden.

Durch eine Oszillation unterhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz war die Bewegung des Lichtkegels wahrnehmbar und diente somit als weitere Lichtfunktion zur Kommunikation mit anderen Fahrern als Hinweis auf einen bevorstehenden Überholvorgang [52].

In den 1980er Jahren entwickelte sich die Idee, eine Scheinwerferlichtverteilung durch einen ausreichend schnell scannenden Lichtkegel zu realisieren. Der möglichst gebündelte Lichtstrahl wird entweder von einem Reflektor, der in zwei Achsen oszillierend angetrieben wird, oder von zwei separaten Spiegeln, welche in jeweils eine Scanrichtung ausgelenkt werden können, abgelenkt und über den auszuleuchtenden Fahrbahnbereich gerastert [53, 54].

Findet diese Rasterbewegung ausreichend schnell statt, so kommt das Talbotsche Gesetz zur Anwendung und für das menschliche Auge verschmilzt der scannende Lichtkegel zu einer gesamtheitlichen Lichtverteilung [55, Kap.4]. Insbesondere Soardo schlug einen Laser als Lichtquelle vor, da dieser durch seine Eigenschaft der geringen Divergenz ein ideales optisches Verhalten beim Ablenken durch die oszillierenden Spiegel aufweist.

In Anlehnung an SOARDO demonstrieren GÖTZ et al. die Kombination einer Basislichtverteilung mit einem frei modulierbaren Anteil mit Hilfe eines 2-Spiegel-Scanners [56]. Eine konventionelle Halogenlampe wird dabei von einem Freiform-Reflektor umgeben, welcher einen Abblendlichtanteil mit horizontaler Hell-Dunkel-Grenze erzeugt und einen weiteren Anteil der abgegebenen Strahlung auf zwei Spiegel kollimiert, die auf Drehachsen zweier Galvanometer-Motoren fixiert werden. Mit Hilfe dieses Aufbaus wurden die Lichtfunktionen Abblendlicht mit asymmetrischen Anteil, Autobahnlicht und Fernlicht durch entsprechende Ansteuerung der Spiegel realisiert.

Aufgrund der optischen Verluste hatte dieses System jedoch noch niedrigere Beleuchtungsstärken im Vergleich zu bis dahin konventionellen Scheinwerfermodulen.

### 3.1.1. ANSÄTZE VON LASERSCANNERN FÜR SCHEINWERFER

Nach den ersten Erfahrungen mit Laserlichtquellen im Scheinwerfer wurden verschiedene Ansätze betrachtet, um die Vorteile des Lasers mit einer intelligenten Lichtfunktion zu kombinieren.

Das Fraunhofer-Institut für Siliziumtechnologie entwickelte einen in zwei Achsen resonant schwingenden Spiegel, welcher als MOEMS (Micro-Opto-Electro-Mechanical System) aufgebaut ist und Leistungsdichten der im Scheinwerfer benötigten Laserstrahlung stand hält [57]. Da die Weißlichtprojektion über die Konvertierung eines blauen Laserstrahls erfolgt, kann die Reflexivität der Spiegeloberfläche bezüglich des Wellenlängenbereichs um 450 nm optimiert werden. Der Spiegel ist in einer sogenannten Quadpod-Anordnung nicht-kardanisch gelagert, wie in Abb. 3.1 dargestellt.

Durch die resonante Anregung der beiden Achsen erfolgt eine harmonische Schwingung, die eine cosinusförmige Geschwindigkeitsverteilung erzeugt. Die Folge ist eine hohe Winkelgeschwindigkeit der Scanbewegung im Zentrum der Lichtverteilung, während die Randbereiche durch die längere Aufenthaltsdauer des Lasers eine höhere Intensität aufweisen.

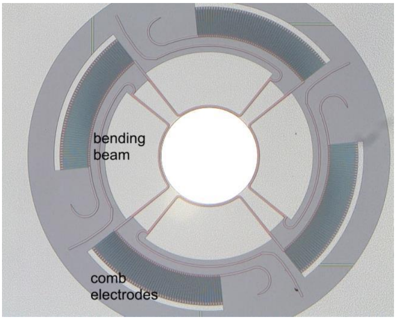



**Abbildung 3.1.:** Resonanter quadpod-Spiegel; 1mm Spiegeldurchmesser. Die vier Federaufhängungen erlauben gleichzeitig eine optimale thermische Anbindung und einen gleichförmigen Einfluss der absorbierten Laserleistung durch Reflexionsverluste auf beide Scanachsen. Aus [57]

Diese Charakteristik, wie in Abb. 3.2 A) gezeigt, ist für den Einsatz im Scheinwerfer von Nachteil, da nicht die Randbereiche einer Lichtverteilung, sondern das Zentrum die beste Ausleuchtung aufweisen sollte, damit die Fahrbahn und deren unmittelbare Umgebung durch den Fahrer optimal wahrgenommen werden kann. Der MOEMS-Scanner ist allerdings in der Lage die Amplitude einer Scanachse zu variieren und somit die Lichtverteilung umzuformen, wie in Abb. 3.2 B) dargestellt. Diese Adaption der Schwingung kann durch Phasenmodulation des Treibersignals, Amplitudenmodulation, Frequenzmodulation, Pulsweitenmodulation oder einer Kombination dieser Methoden erfolgen [58].

Im Vergleich zum Ansatz des Fraunhofer-Instituts der Weißlichtkonversion eines gescannten blauen Laserstrahls kombinierten ROTH et al. einen 2-Achsen-Scanner mit RGB-Laserlichtquellen [59]. Neben einer weißen Grundlichtverteilung durch Superposition der monochromen Laserstrahlen können weitere Lichtfunktionen realisiert werden wie beispielsweise ein Spurlicht zur Visualisierung der Fahrzeugposition und -trajektorie.

Werden lediglich einzelne Laserkanäle aktiviert, können farbige Symbole auf die Fahrbahn projiziert werden, die den Fahrer auf Gefahrensituationen hinweisen oder dessen Navigation unterstützen [60]. Durch die cosinusförmige Bewegung der beiden Scan-Achsen ist aber auch hier der Nachteil einer erhöhten Leuchtdichte in den Randbereichen der Lichtverteilung vorherrschend. Ein

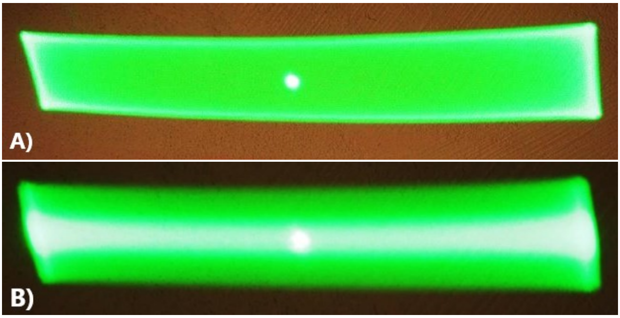



**Abbildung 3.2.:** Kameraaufnahmen von Intensitätsverteilungen eines grünen Lasers, abgelenkt vom Scanner aus Abb. 3.1. Das lokale Maximum im Mittelpunkt der Lichtverteilung ist ein ungewollter Reflex der Glaseinhausung des Spiegels. A) Beide Scan-Achsen im resonanten Betrieb; maximale Intensität an Rändern der Lichtverteilung deutlich zu erkennen aufgrund der resonanten Spiegelbewegung. B) Umverteilung der Intensität durch Modulation der vertikalen Scanachse. Aus [58]

Lösungsansatz ist das Dimmen der Laserquellen zu den Zeitpunkten, wenn der Spiegel am Umkehrpunkt seiner Schwingung ist. Der notwendige Vorhalt an Laserleistung für die Ausleuchtung des relevanten Fahrbahnbereichs ist allerdings signifikant und durch heutige Laserlichtquellen nicht wirtschaftlich umzusetzen, wie GUT analysiert hat [61, Kap.4.2].

Eine weitere Umsetzungsmöglichkeit eines scannenden Systems stellte YAMAMURA vor, bei welchem ein Lichtstrahl über eine rotierende Scheibe mit gekippten Rotorblättern auf eine Sekundäroptik abgelenkt wird. Jede Position der Scheibe resultiert in einem anderen Reflexionswinkel und eine ausreichend schnelle Rotation führt zu einer Scan-Bewegung, die eine ausgedehnte Lichtverteilung generiert. Durch entsprechendes Deaktivieren der LED-Lichtquelle können Winkelbereiche unbeleuchtet bleiben und damit ein blendfreies Licht realisiert werden [62]. Eine individuelle Lichtverteilung durch Beschleunigen oder Verlangsamen der Spiegelscheibe ist allerdings herausfordernd, da große mechanische Kräfte bei diesem Aufbau notwendig wären.

Im Jahr 2014 schlossen sich die Forschungspartner AUDI AG, Osram GmbH, Robert Bosch GmbH und das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) sowie

dem assoziierten Partner ZKW[1] zusammen, um den Ansatz von SOARDO mit der gemeinsamen Erfahrung in der automobilen Beleuchtung neu aufzugreifen und einen Laserscannerscheinwerfer zu realisieren [63]. Mit der Verfügbarkeit von automotive-qualifizierten Laserdioden [64] und den Entwicklungsmöglichkeiten eines MOEMS-Spiegels für den Einsatz in einem Scheinwerfer [65] wurde im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsprojekt *intelligentes Laserlicht für kompakte und hochauflösende adaptive Scheinwerfer* (iLaS) ein Laserscanner für Scheinwerfer untersucht und prototypisch umgesetzt.

### 3.1.2. LASERSCANNER-PROTOTYP

In der Konzeptphase des iLaS-Förderprojekts wurde unter den Anforderungen von Beleuchtungsstärke, Öffnungswinkel des Ausleuchtbereichs und Auflösung der Ansatz eines zweidimensionalen Laser-Scanners hinsichtlich Effizienz, Komplexität und Kosten bewertet. Aufgrund der adressierten Herausforderungen eines harmonisch schwingenden Zweiachsspiegels wurde dieser Ansatz nach eingehender Analyse nicht weiter verfolgt und stattdessen ein eindimensional scannendes Konzept untersucht.

Das sogenannte CurtainBeam-Design besteht aus einem rechteckigen Spiegel, welcher nicht in einem resonanten, sondern in einem quasi-statischem Betrieb um nur eine Achse bewegt wird. Die Anregungsfrequenz ist wesentlich niedriger als die erste Eigenfrequenz des MOEMS-Spiegels und die Position wird direkt durch die extern treibende Kraft vorgegeben. Somit kann nahezu jede beliebige Bewegungskurve des Spiegels realisiert werden, was die Nutzungseffizienz des zur Verfügung stehenden Laserlichts erhöht und die Lichtverteilung innerhalb des möglichen Winkelbereichs flexibel gestalten lässt [66].

Der Kompromiss des eindimensional scannenden Spiegels soll in einem innovativen Laserscanner-Scheinwerfer dennoch auch in der vertikalen Achse flexible Lichtverteilungen erlauben. Im iLaS-Projekt wurde deshalb ein länglicher Spie-

[1] ZIZALA Lichtsysteme GmbH

gel entwickelt, auf welchem 6 Laserdioden in vertikaler Anordnung abgebildet werden.

Da im Scheinwerfer nur ein begrenzter Bauraum zur Verfügung steht, muss das Laserscannermodul sehr kompakt konstruiert werden. Insbesondere der optische Pfad stellt dabei eine Herausforderung dar. Ein minimales Modulvolumen ist nur durch mehrfaches Umlenken der Laserstrahlen zu erreichen, jedoch erhöht die Anzahl von optischen Bauelementen wie Umlenkspiegel oder Linsen die Komplexität der Justage jedes einzelnen Laserstrahls auf die MOEMS-Spiegeloberfläche und den Weißlichtkonverter [67]. Abbildung 3.4 zeigt schematisch den Aufbau der zentralen Laserscanner-Einheit.

Die Strahlen der sechs Laserdioden werden zunächst über ein Linsensystem, dem Beam Combiner, parallel zueinander ausgerichtet, um anschließend über Umlenkspiegel auf den MOEMS-Spiegel gebracht zu werden. Die gescannten Strahlen treffen dann auf einen transmissiv ausgelegten Konverter und können im Anschluss auf die Fahrbahn projiziert werden.

Um Latenzen des Signalwegs zu minimieren, ist die Elektronik zur Ansteuerung des Mikrospiegels ebenfalls in die Laserscanner-Einheit integriert. Das aus Aluminium gefertigte Gehäuse muss erhöhten Robustheitsanforderungen genügen, da einerseits die empfindlichen Bauteile gegenüber äußeren Einflüssen geschützt werden müssen und andererseits keine schädliche, von den Laserdioden ausgehende Strahlung der Laserschutzklasse 4 austreten darf. Die Kameraaufnahme in Abb. 3.3 zeigt zwei aktive Laserkanäle auf ihrem optischen Pfad bis zum MOEMS-Spiegel und die Flächenausleuchtung durch die Scanbewegung des Spiegels. Da für die Aufnahme die Konverterbaugruppe entfernt wurde, tritt blaues Laserlicht aus dem Gehäuse aus.

Die eingesetzten Laserdioden erfüllen die automotive-Anforderungen für den Einsatz in Scheinwerfern. Sie basieren auf den bereits in Serienfahrzeugen eingesetzten Modulen und haben in der hier genutzten Entwicklungsstufe eine höhere optische Ausgangsleistung von $P_{\text{opt}} = 3\,\text{W}$ bei $25\,°\text{C}$ und einen verbesserten Wirkungsgrad (WPE - Wall Plug Efficiency) von $32\,\%$. Zudem führt die Bauform des *TO90-Packages* zu einer besseren thermischen Anbindung der Laserdiode [69].

Der Mikrospiegel hat eine Spiegelfläche von $1,5 \times 5\,\text{mm}^2$, deren Anteil von $0,81 \times 4{,}36\,\text{mm}^2$ der optischen Nutzfläche entspricht. Angetrieben wird der

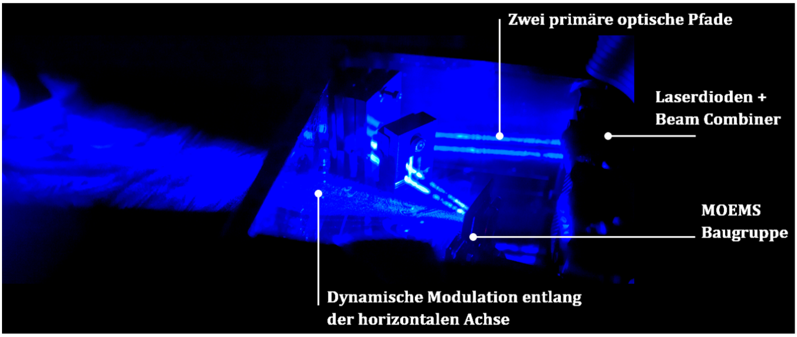



**Abbildung 3.3.:** Kameraaufnahme der geöffneten, aktiven Laserscanner-Einheit. Zur besseren Erkennbarkeit sind nur zwei Laserkanäle aktiv. Deutlich erkennbar ist die Aufweitung des kollimierten Laserstrahls durch die Scanbewegung des Mikrospiegels. Austreten blauer Laserstrahlung aus dem Gehäuse aufgrund der entfernten Konverterbaugruppe. Aus Präsentation zu [68]

Spiegel elektromagnetisch. Das Funktionsprinzip und die dabei wirkenden Kräfte sind in Abb. 3.5 ersichtlich.

Der Antriebsrahmen, auf dem der Spiegel aufgebracht ist, ist an zwei Federn mit dem Halter verbunden und wird von Leiterbahnen umrandet. Geraten nun Ladungsträger bei angelegter Spannung in Bewegung, so erzeugen sie aufgrund eines senkrecht zur Rotationsachse verlaufenden, permanenten Magnetfeldes eine Kraft, die den Spiegel aus seiner Ruhelage auslenkt [70]. Da diese Lorentzkraft selbst bei geringen Spannungen relativ stark ist, ermöglicht dies eine quasistatische Positionierung des Spiegels und damit variable Intensitätsverteilungen der Laserstrahlung auf dem Weißlichtkonverter.

Im hier entwickelten Spiegelsystem beträgt der maximale mechanische Auslenkwinkel $\pm 6°$. Die Spiegeloberfläche ist mit einer Braggbeschichtung versehen, um die Reflektivität im blauen Wellenlängenbereich zu maximieren. Der Spiegel mit Halter und elektromagnetischem Antrieb werden von einem Gehäuse umgeben, welches die Baugruppe hermetisch abdichtet. Dies ist notwendig, damit es während des Betriebs im Fahrzeug zu keiner Zerstörung durch Staub oder andere kleine Partikel kommt. Damit zudem keine Verluste an der Abdeckscheibe der Verkapselung auftreten, wird diese zur Vermeidung von Störreflexen mit einer

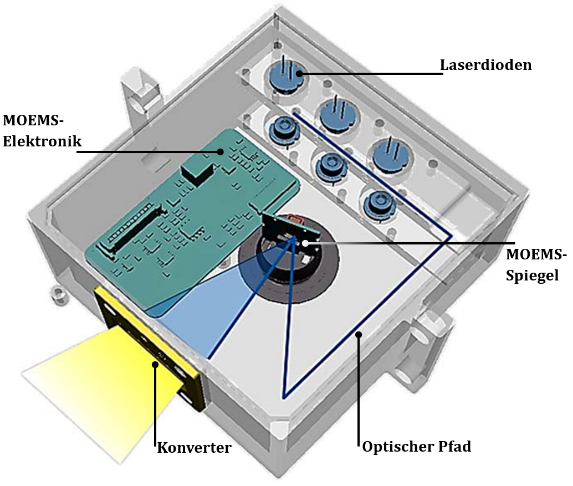



**Abbildung 3.4.:** Schematischer Aufbau der zentralen Laserscanner-Einheit. Die Strahlen der 6 Laserdioden werden über einen Beam Combiner und Umlenkspiegel vertikal übereinander angeordnet auf den MOEMS-Spiegel abgelenkt und durch einen transmissiven Konverter als weißes Licht auf die Fahrbahn projiziert. Die Ansteuerungs-Elektronik für den Spiegel ist in das Gehäuse integriert. Modifiziert, aus [65]

Antireflexionsschicht versehen und verkippt eingebaut [65]. Das letzte Element im Strahlengang der zentralen Scanner-Einheit ist der Weißlichtkonverter. Bei der Weißlichterzeugung durch einen Laser-aktivierten Konverter kann zwischen einem reflektiven und transmissiven Konzept unterschieden werden.

Reflektiv bedeutet, dass der Konversionskristall auf einem Trägermaterial aufgebracht ist, welches idealer Weise spiegelnd für die auftretenden Wellenlängen ist. Die Laserlichtquelle befindet sich auf der gleichen Seite, in dessen Richtung das weiß-konvertierte Licht abgestrahlt wird. Durch den direkten Kontakt zum Trägermaterial ist hier eine ideale thermische Anbindung gegeben, wodurch höhere Gesamtleistungen blauer Strahlung auf den Konverter gebracht werden können und somit höhere Leuchtdichten erreichbar sind.

Beim transmissiven Ansatz wird die blaue Laserstrahlung durch den Konverter geleitet, welcher auf einem Saphir-Substrat sitzt. Als weitere Schichten befindet sich ein dichroitischer Spiegel und eine Lage Klebermaterial zwischen Konver-

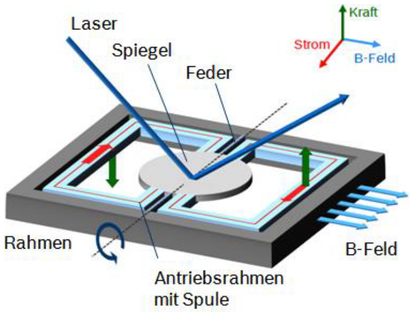



**Abbildung 3.5.:** Schematischer Aufbau des MOEMS-Spiegels. Durch die stromdurchflossenen Leiter im Antriebsrahmen wirkt aufgrund des permanenten Magnetfeldes im Tragrahmen eine Lorentzkraft senkrecht zu Strom und Magnetfeld und lenkt somit den Spiegel aus. Aus [71]

ter und Substrat. Die Spiegelschicht verhindert die Abstrahlung von isotrop konvertiertem Licht in das Gehäuse und erhöht somit die Effizienz des Systems.

Da die Auslegung des optischen Konzepts im transmissiven Ansatz einfacher zu realisieren ist und weniger optische Elemente benötigt, wurde sich im iLaS-Projekt für diesen Weg entschieden. Zu beachten ist allerdings die thermische Belastung des Konverters, da die thermische Anbindung an das Gehäuse und somit an eine externe Kühlung nur über die Kontaktflächen am Rand der Konverterbaugruppe erfolgt. Ein solcher Konverter hat eine nutzbare Fläche von $18 \times 4{,}5\,\text{mm}^2$ und ist in Abb. 3.6 beispielhaft gezeigt.

Die zentrale Scanner-Einheit hat eine Größe von rund $90 \times 90 \times 55\,\text{mm}^3$ und ist in Abb. 3.7 mit verbautem Kühlkörper gezeigt [67]. Die Kühlung des Laserscanners erfolgt über einen passiven Kühlkörper, welcher passend in das Scheinwerfergehäuse eines Audi Q7 (Modelljahr 2015) designt wurde. Zusätzlich wird die Abwärme durch einen aktiven Lüfter vom Modul abgeleitet. Der Kühlkörper ist an die Hinterseite der Scanner-Einheit positioniert, da dort mit den Laserdioden die temperaturkritischsten Elemente sitzen.

Das vom Laser-Scanner erzeugte Lichtbild auf dem Konverterkristall wird abschließend durch eine 70 mm-Sekundäroptik auf die Fahrbahn projiziert. Das Gesamtmodul (Abb. 3.8) hat ein Volumen von $140 \times 237 \times 81\,\text{mm}^3$ und der aus-




**Abbildung 3.6.:** Kameraaufnahme einer Konverterbaugruppe des Laserscanner-Moduls. Die nutzbare Konverterfläche beträgt $18 \times 4{,}5\,\mathrm{mm}^2$. Aus [72]

geleuchtete Bereich des Laserscanners einen Öffnungswinkel von $\pm 6°$ horizontal und $-0{,}5°..2{,}5°$ vertikal durch die 6 diskreten Laserkanäle [73].

### 3.1.3. EINORDNUNG DES SYSTEMS BEZÜGLICH LASERSICHERHEIT

Der in Abschnitt 3.1 beschriebene Prototyp eines Laserscannermoduls soll nachfolgend hinsichtlich des Laserschutzes betrachtet werden. Im Normalbetrieb mit intaktem Konverter stellt sich die Frage, ob auch der Laserscanner die Voraussetzungen zur Klassifizierung nach Lampennorm erfüllt. Das Strahldichtekriterium hierfür lautet:

$$L_T = \frac{1\,\frac{\mathrm{MW}}{\mathrm{m^2\,sr}}}{\alpha}, \tag{3.1}$$

wobei $\alpha$ die Winkelausdehnung der ausgedehnten Laserquelle in 200 mm Entfernung und beschränkt auf Werte zwischen 5 mrad und 100 mrad ist [20, Kap. 4.4]. Diese ist jedoch nicht mit der Strahldivergenz zu verwechseln, sondern gibt an, unter welchem Winkel die scheinbare Quelle im Messabstand erscheint.

Da für den Prototypen keine Messungen vorliegen, soll unter Annahme kritischer Randbedingungen eine Abschätzung durchgeführt werden. Die maximale Fläche, welche als scheinbare Quelle wirken kann, ist die Konverterfläche mit $18 \times 4{,}5\,\mathrm{mm}^2$.




**Abbildung 3.7.:** Zentrale Scanner-Einheit mit Kühlkörper (links) und zusätzlichem aktiven Lüfter (rechts). Deutlich zu erkennen ist die kleine Lichtaustrittsfläche des gelben Konverters von $18 \times 4{,}5\,\mathrm{mm}^2$. Aus [73]




**Abbildung 3.8.:** Komplett montiertes Laserscanner-Modul mit Kühlkörper, Lüfter und Sekundäroptik, welche die erzeugte Lichtverteilung auf die Fahrbahn projiziert. Aus [67]

Die Strahlungsdichte des Moduls kann nicht größer sein als der schlechteste Fall, in dem der Laserstrahl ohne Konverter mit seiner initialen Divergenz ab der Austrittsfläche (Konverterebene) emittiert wird. Als Leistung werden mit Konverter 12,5 W und ohne Konverter 16,5 W angenommen sowie eine Strahldivergenz von 6° [73]. Daraus resultieren die in Tabelle 3.1 angegebenen Werte.

Es zeigt sich, dass das Kriterium zur Klassifizierung des Laserscanners als Lampe erfüllt wird. Lediglich im Fehlerfall eines ruhenden Lasers auf dem Konverter beträgt die Winkelausdehnung 2,57 mrad und liegt damit außerhalb der geforderten Grenzen.

| | kurze Kante | lange Kante |
|---|---|---|
| $\alpha$ [mrad] | 89,94 | 44,99 |
| $L_{T,\text{zulässig}}[\frac{\text{MW}}{\text{m}^2\,\text{sr}}]$ | 11,12 | 22,23 |
| $L_{T,\text{mit K.}}[\frac{\text{MW}}{\text{m}^2\,\text{sr}}]$ | 4,21 | |
| $L_{T,\text{ohne K.}}[\frac{\text{MW}}{\text{m}^2\,\text{sr}}]$ | 5,55 | |

**Tabelle 3.1.:** Berechnete Strahldichtekriterien nach [20, Kap. 4.4] für die beiden Kantenlängen des Konverters für die Winkelausdehnung $\alpha$, sowie die berechneten Werte für den Grenzfall einer Emission mit und ohne Konverter

Aus der Klassifizierung nach Lampennorm oder Lasernorm geht nicht hervor, welche Gefahr von der emittierten Strahlung ausgeht. Daher soll nun der Sicherheitsabstand, engl. Nominal Ocular Hazard Distance (NOHD), bestimmt werden, ab welchem eine Laser-Exposition des Auges durch das Laserscannermodul ungefährlich ist. Ungefährlich bedeutet in diesem Kontext, dass die Gefahr thermischer Schädigung auf Zeitskalen >100 s nicht weiter zunimmt, da die Werte maximal zulässiger Bestrahlung (MZB) nicht überschritten werden [20, Kap. D.2.2]. Der Sicherheitsabstand NOHD wird berechnet:

$$\text{NOHD} = \frac{1}{\theta}\left(\sqrt{\frac{4}{\pi}\frac{P_{\text{Laser}} \cdot t_{\text{Exp}}}{\text{MZB}}} - D_{\text{Laser}}\right) \tag{3.2}$$

$$\text{MZB} = 18 t_{\text{Exp}}^{\frac{3}{4}} \cdot C_6 \ \frac{\text{J}}{\text{m}^2}, \tag{3.3}$$

mit der Divergenz $\theta$, der Laserleistung $P_{\text{Laser}}$, der Expositionszeit $t_{\text{Exp}}$, dem Strahldurchmesser des Lasers $D_{\text{Laser}}$ und der MZB, welche ebenfalls von der Expositionszeit und einem Korrekturfaktor $C_6$ abhängig ist [74]. Die Expositionszeit für das Laserscannersystem ergibt sich zu:

$$t_{\text{Exp}} = k \cdot \frac{7\,\text{mm}}{x} \frac{360}{2\pi} \cdot \frac{T/2}{\gamma} \tag{3.4}$$

Für die nicht-lineare Scanbewegung des Spiegels wird der Faktor $k \leq 10$ eingeführt. Die Periodenlänge $T$ lässt sich aus der Scanfrequenz von 133 Hz berechnen und der Scanwinkel $\gamma$ beträgt 12°. Die Zeit, die ein Detektor des Pupillendurchmessers 7 mm der Strahlung ausgesetzt ist, hängt auch vom Abstand $x$ zum Laserscanner ab.

Damit ergibt sich aus Gleichung (3.2) und Gleichung (3.4) eine Korrelation, welche durch einen iterativen Ansatz näherungsweise lösbar ist. Mit einer Optimalität, welche aussagt wie nahe eine Lösung $X$ zum Optimum ist, der Größenordnung $10^{-12}$ beträgt die NOHD=6 m bei einer Expositionszeit von $t_{\text{Exp}} = 12{,}1\,\text{ms}$ und der Laserleistung von 16,5 W.

Auch hierfür wurde erneut der Schlimmstfall angenommen, dass die komplette Laserleistung ohne eine Abschwächung durch den Konverter aus dem Scannermodul emittiert wird. Für die bekannten 12,5 W Laserleistung nach Konverterdurchgang beträgt die NOHD=5,24 m.

Die reale Distanz, ab der keine Schädigung droht, wird hier jedoch geringer erwartet, da die Abstrahlcharakteristik nach dem Streuprozessen einem Lambert'schen Strahler ähnlicher ist, als der eines Laserstrahls. Dennoch muss die Größenordnung der NOHD von mehreren Metern beim Einsatz eines Serienscheinwerfers beachtet werden. So kann durch zusätzliche funktionale Mechanismen, wie das Einschalten in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit und Kamerabeobachtung des Fahrzeugvorfeldes, eine Exposition von Menschen und Tieren innerhalb des Laserbereichs kleiner als der NOHD verhindert werden.

## 3.2. HOCHAUFGELÖSTE SCHEINWERFERTECHNOLOGIEN MIT DYNAMISCHEN LICHTFUNKTIONEN

### 3.2.1. EINORDNUNG DES LASERSCANNERS IN DEN STAND DER TECHNIK

Die Notwendigkeit und potentiellen Vorteile eines hochaufgelösten Scheinwerfersystems als Weiterentwicklung des blendfreien Fernlichts sind in der automobilen Beleuchtungstechnik erkannt und tiefgehend untersucht worden [75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85]. Allgemein können hochauflösende Technologien für den Einsatz in Scheinwerfern in eine additive und subtraktive Bilderzeugung aufgeteilt werden. In Tabelle 3.2 sind diese genannt und kategorisiert.

Bei additiven Technologien werden nur die Lichtquellen aktiviert, die für die momentan angepasste Lichtverteilung notwendig sind. Im Falle der subtraktiven Systeme wird die bildgebende Einheit dauerhaft mit der gesamten vorgehaltenen Energie beleuchtet und abzudunkelnde Bereiche in der Lichtverteilung durch den Bildgeber absorbiert oder in einen Absorber abgelenkt. Bezogen auf das Kriterium der Energieeffizient sind additive Systeme daher von Vorteil, dennoch weisen subtraktive Technologien Eigenschaften auf, die eine Anwendung in Scheinwerfern plausibilisiert.

Im Folgenden soll daher die Funktionsweise dieser Scheinwerfersysteme vorgestellt und mit dem Laserscanner-System verglichen werden. Eine Zusammenfassung der Technologien bezogen auf den Einsatz von Laserlichtquellen ist in [86] zu finden.

#### GLEITENDE LEUCHTWEITE

Für das System der gleitenden Leuchtweite sind Module für bestimmte Lichtfunktionen auf beweglichen Trägern montiert und mit einem Schrittmotor versehen. Somit kann zum Beispiel der Abblendlichtanteil, welcher auf die entgegen-

| Scheinwerfertechnologie | additiv | subtraktiv |
|---|---|---|
| gleitende Leuchtweite | ✘ | |
| LED-Matrix (MxB) | ✘ | |
| $\mu$AFS | ✘ | |
| DMD | | ✘ |
| LCD | | ✘ |
| LCoS amplitudenmoduliert | | ✘ |
| LCoS phasenmoduliert | ✘ | |
| Laserscanner | ✘ | |

**Tabelle 3.2.:** Übersicht und Einordnung hochauflösender Scheinwerfersysteme

kommende Fahrbahn leuchtet, durch Anheben der Hell-Dunkel-Grenze (HDG) in seiner Reichweite variiert werden [87].

Durch optionales Hinzuschalten des Fernlichts wird eine optimale Ausleuchtung der Fahrsituation für den Fahrzeugführer gewährleistet. Dabei werden andere Verkehrsteilnehmer nicht geblendet, da die Regulierung der HDG und die Fernlichtaktivierung mit der Information der Innenspiegelkamera gekoppelt ist. Dadurch werden vorausfahrende und entgegenkommende Fahrzeuge erkannt und die Lichtverteilung entsprechend angepasst [88].

Eine Erweiterung dieser Technologie durch eine zusätzliche Bewegung um die vertikale Fahrzeugachse ermöglicht das Erzeugen von Sektoren, in denen andere Fahrzeuge entblendet werden [89]. Beim sogenannten maskierten Dauerfernlicht ist die Ausleuchtung der Fahrbahnumgebung mit größerer Reichweite gewährleistet, als dies bei der Absenkung der HDG der Fall ist [90]. Zudem kann hiermit ein Kurvenlicht umgesetzt werden, bei dem der Schwerpunkt der Lichtverteilung im Verlauf der Kurve bewegt wird.

Im Vergleich zum Laserscanner wird das gesamte Lichtmodul mechanisch bewegt, wodurch der ausgeblendete Bereich bei mehreren erkannten Objekten sehr breit ist. Wird beispielsweise ein entgegenkommendes Fahrzeug im linken Bereich des Kamerasichtfeldes und ein vorausfahrendes Objekt im rechten Bereich erkannt, so kann ein Winkelausschnitt zwischen diesen Fahrzeugen in der Straßenmitte nicht optimal ausgeleuchtet werden. Da jedoch genau hier die

relevanten Informationen für die Fahraufgabe erkannt werden sollen, ist das gLw-System nicht als ideal zu benennen. Der Laserscanner erzeugt blendfreie Bereiche durch temporäres Abschalten der Laserdioden im entsprechenden Winkelbereich erkannter Objekte. Es sind also mehrere Ausblendbereiche realisierbar und damit eine optimale Ausleuchtung des Verkehrsraumes vor dem Fahrzeug gegeben.

### LED-MATRIX-FERNLICHT

Beim LED-Matrix-Fernlicht, auch MatrixBeam genannt, wird die Fernlichtverteilung durch eine Superposition mehrerer Leuchtsegmente erzeugt. Jedes dieser Segmente wird von einer separaten LED beleuchtet. Durch eine Verknüpfung der Kamerainformation und der Lage der einzelnen Segmente kann ein blendfreies Fernlicht umgesetzt werden.

Im Vergleich zur gleitenden Leuchtweite und dem maskiertem Dauerfernlicht kann die Lichtverteilung nur diskret variiert und der verfügbare Lichtstrom nicht umverteilt werden. Ein Kurvenlicht lässt sich unter Vorhalt von optischer Leistung der LEDs durch eine Variation der Dimmkurve über die Segmente umsetzen. Der wesentliche Vorteil des MatrixBeam liegt in der Möglichkeit, mehrere ausgeblendete Bereiche zu erzeugen. Zudem ist das System sehr energieeffizient, da nur die LEDs Leistung verbrauchen, die für die blendfreie Beleuchtung der momentanen Fahrbahnsituation benötigt werden [89, 15, 16].

In den Arbeiten von ROSLAK und HUMMEL werden die Nutzungsgrade von verschiedenen adaptiven Fernlichtsystemen verglichen. Dabei ist auch bei unterschiedlichen Berechnungsverfahren die Tendenz übereinstimmend, dass die Ausleuchtung und damit die Sicht-Unterstützung für den Fahrer durch aufgelöste Systeme mit individueller und zunehmender Pixelzahl verbessert wird [91], [89]. Neben dem segmentweisen Ausblenden des MatrixBeams sind daher hochaufgelöste Systeme in der Entwicklung von höherem Interesse. Der Laserscanner ist ein solches System, weil sich die Auflösung nicht mehr digital durch einzeln angesteuerte Pixel ergibt, sondern nur durch den Kontrast des Konverters und die Limitierungen der elektronischen Ansteuerung begrenzt ist [92].

## $\mu$AFS

Im BMBF-geförderten Forschungsprojekt *µAFS* haben sich die Partner Daimler, HELLA, OSRAM, Fraunhofer IZM+IAF und Infinion zusammengeschlossen, um ein kompaktes, hochaufgelöstes LED-Matrix-Modul umzusetzen. Der Ansatz der Fahrbahnausleuchtung ist dabei analog zum MatrixBeam, neu ist jedoch neben der höheren Auflösung von 1024 Pixeln und der Anordnung in mehrere horizontale Reihen vor allem die Bauform.

Während in den ersten Matrix-LED-Systemen LEDs konventioneller Bauform von $1\,\text{mm}^2$ zu Gruppen hinter mehreren Reflektoren angeordnet wurden, weißt das $\mu$AFS-Modul mit einer Pixelgröße von $115 \times 115\,\text{mm}^2$ ein sehr kompaktes Design auf. Diese Bauweise ist nur dadurch realisierbar, da die blauen LEDs, welche sich unter einer gemeinsamen Konverterschicht befinden, aus der Silizium-Schicht mit beiden Ladungsträgerarten versorgt werden. Dadurch entfällt der Licht-absorbierende Kontakt auf der auskoppelnden Oberseite der LED [93], [94], [95].

Gegenüber dem LED-Matrix-Fernlicht ist die Pixelzahl und damit auch die Variabilität der Lichtverteilung erhöht. Im Vergleich zur Laserscanner-Technologie stellen die diskreten LEDs eine Limitierung der exakten Ausblendung von anderen Verkehrsteilnehmern dar. Ebenso kann das erzeugte Licht aus einem $\mu$AFS-Modul nicht beliebig umverteilt werden. Lichtfunktionen wie ein Kurvenlicht sind nur synthetisch darstellbar, indem Lichtstrom vorgehalten wird und durch Dimmen entsprechender LEDs eine Lichtschwerpunktverschiebung dargeboten wird. Aufgrund der variabel einstellbaren Bewegungskennlinie vom Mikrospiegels des Laserscanners kann dieser den verfügbaren Lichtstrom tatsächlich umverteilen und damit adaptive Lichtfunktionen umsetzen.

## DMD

Die Lichtmodulation via eines Mikrospiegelarrays, dem *Digital Micromirror Device* (DMD), ist bereits aus der Unterhaltungselektronik bekannt und eine

etablierte Technologie für Beamer. Der DMD-Chip wird von einer zentralen Lichtquelle beleuchtet und die einzelnen Mikrospiegel können neben dem Ruhezustand in zwei Positionen gekippt werden. Das Licht wird also entweder in der AUS-Position in die Richtung eines optischen Absorbers im Inneren des Scheinwerfers abgelenkt oder in der AN-Position in Richtung einer projizierenden Scheinwerferoptik reflektiert. Durch eine ausreichend schnelle Ansteuerung und Kippbewegung zwischen den Zuständen lassen sich über die damit umgesetzte optische Pulsweitenmodulation ebenso Graustufen auf der Fahrbahn darstellen. Der Vorteil des DMD ist die Größe der Mikrospiegel und die damit mögliche Auflösung der Lichtverteilung.

Der erste automotive-qualifizierte DMD hat bei einer Chipgröße von 0,3″ eine Auflösung von $800 \times 480px^2$ und damit eine Anzahl von rund 380.000 Bildpunkten. Dies ermöglicht nicht nur eine noch exaktere Ausblendung anderer Verkehrsteilnehmer, sondern die Projektion von neuen Lichtfunktionen in Form von Symbolen oder anderen individuellen Inhalten vor dem eigenen Fahrzeug [81].

Im Vergleich zum Laserscanner sticht zwar die enorme Auflösung heraus, jedoch muss für jeden Pixel der für alle Lichtfunktionen maximal benötigte Lichtstrom jederzeit vorgehalten werden [96]. Dieser subtraktive Ansatz der Bilderzeugung ist gegenüber der Laserscanner-Technologie sehr ineffizient.

### LCD

Bereits 1989 wurde die Idee patentiert, einen segmentierten Flüssigkristall als Schattenerzeuger in einem Scheinwerfer zu nutzen, um verschiedene Lichtverteilungen zu generieren [97]. Im Rahmen der Förderinitiative "Intelligente Beleuchtung", in der auch das iLaS-Förderprojekt unterstützt wurde, schlossen sich die Partner HELLA, Elmos Semiconductor, Merck, Porsche Engineering, Scheizer Electronic und die Universität Paderborn zum Förderprojekt *Volladaptive Lichtverteilung für eine intelligente, effiziente und sichere Fahrzeugbeleuchtung* (VoLiFa2020) zusammen [98].

Zum Erzeugen beliebiger Lichtverteilungen wird ein LCD-Panel von einer Hochstrom-LED beleuchtet und durch entsprechende Polarisierung des verfügbaren Lichts in den einzelnen Pixeln die gewünschten Winkelbereiche ausgeblendet. Da eine übliche LED-Quelle unpolarisiertes Licht emittiert, muss zunächst mit einem Polarisationsfilter nur eine bestimmte Polarisationsrichtung auf die Flüssigkristall-Matrix transmittiert werden. Um die hierbei auftretenden Verluste von bis zu 54 % zu minimieren, wird nach dem ersten Polarisationsfilter ein weiterer optischer Pfad eröffnet, in dem das verbleibende Licht mit der entgegengesetzten Polarisation genutzt wird. Im Scheinwerfermodul werden abschließend beide optischen Pfade überlagert und somit eine redundante Beleuchtung der Fahrbahn gewährleistet. Dies bedeutet, dass eventuell defekte Pixel in einem der LCDs keinen dunklen Fleck in der Ausleuchtung erzeugen, sondern dieser vom zweiten Display teilweise kompensiert wird [99], [100], [101].

Der Vorteil des im VoLiFa2020 aufgebauten Scheinwerfers gegenüber dem Laserscanner ist der ausgeleuchtete Winkelbereich, welcher mit $\pm 20°$ horizontal und $\pm 5°$ vertikal signifikant größer ist. Durch die subtraktive Bilderzeugung und optischen Verluste im Strahlengang der Filter und LCDs ist die höhere Effizienz des Laserscanners allerdings als Argument aufzuführen. Auch die Umverteilung des Lichtschwerpunktes ist mit dem LCD-Ansatz nur durch Vorhalt von Lichtstrom zu realisieren.

## LCoS amplitudenmoduliert

Die LCoS- (Liquid Crystal on Silicon) Technologie erzeugt Hell- und Dunkelbereiche sehr ähnlich zu LCDs. Zentrales System ist auch hier eine Flüssigkristallschicht, welche einfallendes Licht in seiner Polarisation ändert oder konstant hält. Der Unterschied zum LCD besteht darin, dass das Licht nicht transmissiv verarbeitet wird, sondern der LCoS reflektiv arbeitet. Dabei ist die untere Elektrode, welche auf dem Silizium-Substrat aufgebracht ist, die Spiegelfläche.

Diese Bauform hat mehrere Vorteile gegenüber dem transmissiven LCD. Aufgrund der gesamtheitlich kontaktierbaren Unterseite des Silizium-Substrats

dient diese als thermische Grenzfläche und ermöglicht damit ein besseres Thermomanagement. Zudem ermöglicht die Bauweise einen kleineren Pixelabstand im Vergleich zum LCD. Dies steigert die optische Effizienz und ermöglicht höhere Auflösungen [102]. Bei einer Beleuchtung mit weißem Licht zeigen sich jedoch auch hier die Nachteile des ausblendenden Verfahrens mit Hilfe der Polarisationsanalyse. Vorteilhafter wäre hier die Nutzung von Lichtquellen, welche initial polarisiertes Licht emittieren, wie z.B. Laserdioden. Amplitudenmodulierte LCoS-Systeme weisen gegenüber dem Laserscanner allerdings die gleichen Nachteile auf wie alle subtraktiven Ansätze (vgl. Tabelle 3.2).

### LCoS phasenmoduliert

Durch die Bauweise eines LCoS ergeben sich weitere Möglichkeiten der Lichtformung als eine reine Modulation der Lichtamplitude. Die Umverteilung von Licht erfolgt beim phasenmodulierten LCoS nicht über einen refraktiven optischen Pfad, sondern durch das Formen der Lichtwellen in einem diffraktiven Ansatz. Die einzelnen Pixel des LCoS wirken dabei als schaltbare Verzögerungsplatte für die elektromagnetische Welle [103].

Die Pixelmatrix im Ganzen induziert somit eine räumliche Phasenverteilung, quasi ein Hologramm, welche ein Beugungsmuster in der ersten Ordnung des reflektierten Lichts hervorruft. Dafür muss der LCoS jedoch von linear polarisiertem, kohärentem Licht beleuchtet werden. In einem Prototyp wurde dies mit Laserdioden sichergestellt. Da für den Einsatz im Scheinwerfer weißes Licht gefordert ist, wird eine Farbmischung von roten, grünen und blauen Laserdioden genutzt und für jede Wellenlänge die Phasenverteilung auf dem LCoS angepasst. Um die Pixelverteilung zu erhalten, muss in einem iterativen Verfahren die Phasenverteilung ermittelt werden, welche in der Ziellichtverteilung durch Beugung resultiert.

Erste Ergebnisse dieses Ansatzes wurden bereits veröffentlicht, weisen jedoch noch Potential bezüglich Homogenität, Farbmischung und Kontrast auf. Die kritischsten Komponenten sind hierbei die Laserdioden, welche eine hohe Strahlqualität unabhängig von Umwelteinflüssen wie der Temperatur aufweisen müssen. Aufgrund des aktuellen Entwicklungsstandes von Laserdioden muss die

Weißlichtkonvertierung von blauen Laserdioden der Überlagerung von roten, grünen und blauen Dioden vorgezogen werden [104].

Gegenüber dem phasenmodulierten LCoS ist der Laserscanner-Ansatz in Farbhomogenität und Bildwiederholungsrate, in der die Lichtverteilung auf die entsprechende Fahrsituation angepasst werden kann, zu bevorzugen. Die direkte Projektion von Laserstrahlung mit dem LCoS ist aber neben den zu beachtenden Sicherheitsaspekten ein weiter zu verfolgender Ansatz, insbesondere wenn im Zusammenhang mit autonom fahrenden Fahrzeugen die Kommunikation durch farbliche Projektion auf der Fahrbahn an Relevanz zunimmt.

### 3.2.2. ELEKTRONIKARCHITEKTUR ZUR UMSETZUNG HOCHAUFGELÖSTER LICHTFUNKTIONEN

Motiviert wird die Entwicklung neuer Scheinwerfersysteme durch die ermöglichte Umsetzung neuer Lichtfunktionen, welche dem Fahrer und dessen Umfeld Vorteile bei der Erfüllung der Fahraufgabe und Einschätzung der Verkehrssituation bieten. Der Laserscannerscheinwerfer hat ebenso wie die in Abschnitt 3.2.1 vorgestellten Systeme die Gemeinsamkeit, dass mit steigender Auflösung auch die Varianz der möglichen Lichtverteilungen zunimmt. Dies stellt neue Anforderungen an die Elektronikarchitektur im Fahrzeug bezüglich der Berechnung von Ziellichtverteilungen und Kommunikation innerhalb des Fahrzeugs.

Ein typisches Schema ist in Abb. 3.9 dargestellt. Die wichtigste Information zur Bestimmung der Ziellichtverteilung wird durch die Kamerasensorik gewonnen, welche die Szenerie vor dem Fahrzeug wahrnimmt und erkannte Objekte mit ihrer Position, Größe, Abstand und ggf. prädizierter Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit zur Verfügung stellt. Ein zentrales Steuergerät empfängt diese Informationen sowie weitere Signale, welche den Fahrzeugzustand beschreiben (z.B. Geschwindigkeit, Umgebungshelligkeit, Fahrzeugposition, Lenkwinkel und sonstige Fahrereingaben) über ein Bussystem. Die berechnete Ziellichtverteilung muss dann ebenfalls über ein Bussystem an das Laserscannermodul übermittelt werden. Die Übertragung via CAN-Bus ist ein Sonderfall in der Gruppe der hochauflösenden Scheinwerfersysteme. Die Informationsmenge




**Abbildung 3.9.:** Schema der Elektronikarchitektur zur Ansteuerung eines Laserscanners

zur Darstellung der Lichtverteilung reicht von einfachen Schwenkwinkeln des gLw-Systems, die in einem Signal übertragen werden können, über die diskreten Dimmwerte einzelner LEDs des MatrixBeam bis zum Videostream per HDMI oder LVDS eines DMD- oder LCD-Scheinwerfersystems.

Die hohe Auflösung des Laserscanners wird nicht über die diskrete Ansteuerung einzelner Pixel realisiert, sondern durch die geringe diskrete Verschiebeauflösung der Lichtverteilung. Das bedeutet, dass sowohl die Bewegungskurve des MOEMS-Spiegels als auch die Aktivierung und Deaktivierung der Laserdioden sehr schnell geändert werden können. Der Spiegel kann seine Kennparameter Öffnungswinkel, Lichtschwerpunktsform und -position innerhalb von 40 ms zwischen den Systemgrenzen ändern. Daraus resultiert für die Lichtschwerpunktverschiebung beispielsweise eine Winkelgeschwindigkeit von 275 $\frac{\circ}{s}$, welche jedoch für den Komfort des Fahrers nicht ausgenutzt wird, da sich das Lichtbild sonst zu hektisch ändert [67].

Das limitierende Kettenglied ist die verarbeitende Funktion im Steuergerät, welche selbst für ein MatrixBeam mit einer Pixelzahl <100 Pixel eine Laufzeit von mehreren Millisekunden hat und daher die Anforderung an die Ziellichtverteilung mit einer Zykluszeit von 20 ms an den Scheinwerfer sendet. Selbst bei einer Softwareoptimierung und dem Erreichen einer Sende-Zykluszeit von 10 ms würde der Spiegel mit einer Scanfrequenz von 133 Hz eine komplette Bewegung

ausgeführt haben, bevor die Information der Solllichtverteilung übermittelt wurde. Für den Laserscanner wird daher ein neuer Ansatz gewählt.

Die Fusion der fahrzeugseitigen Eingangssignale mit den Kameraobjektdaten für die adaptiven Lichtfunktionen erfolgt weiterhin auf einem zentralen Steuergerät. Auch die Anforderung des Öffnungswinkels und der Lichtschwerpunktverschiebung durch den Laserscanner erfolgt über direkte Signale. Die Aktivierung und Deaktivierung der Laserdioden wird jedoch, je nach Lage des auszublendenden oder hervorzuhebenden Objektes, durch eine Laserscanner-interne Steuereinheit getriggert. Nur so kann die Rückmeldung der momentanen Spiegelposition mit der Solllage und der daraus folgend notwendigen Laserbestromung synchron ausgewertet werden.

Als auszublendende Objekte werden nicht die Kamera-Rohdaten an die Scanner-interne Steuereinheit gesendet, sondern Polygone mit 6 Stützpunkten, welche die Objektform umranden und ein Dimmwert (bspw. für Schilderentblendung, hier ist ein Abdimmen ausreichend). Somit wird die Buslast verringert, da die Rohdaten der Kamera Informationen zu Objektgeschwindigkeiten, Objekttyp, Objektclustern und Objekthistorie (neu erkannt oder aus vorherigen Klassifizierungszyklen bekannt) pro Objekt beinhalten.

Als zentrales Steuergerät im aufgebauten Prototypen kommt eine *MicroAutoBox II* (MABX) der Firma dSPACE zum Einsatz, welche eine schnelle Änderung des Funktionsalgorithmus und seiner Parameter erlaubt und über einen privaten CAN-Bus direkt mit den Scannermodulen in den Scheinwerfern kommuniziert. Zudem ist über eine ebenfalls mit der MABX verbundenen Schalterbox in der Mittelkonsole des Fahrzeugs die Aktivierung bestimmter Teilfunktionen oder Parametereinstellung möglich. Über eine Verbindung der MABX zum Gateway des Fahrzeugs werden alle relevanten Fahrzeugdaten für die Funktionen abgegriffen.

### 3.2.3. KURVENLICHT

Das Kurvenlicht ist Teil der AFS-Funktionen (AFS: Adaptive Frontlicht Systeme), welche in den ECE-Regelungen 123 definiert sind und ermöglicht das

Ausleuchten der Fahrbahn entlang von Kurven über die Grundlichtverteilung des Abblendlichts hinaus [105]. Ziel dieser Lichtfunktion ist es, dem Fahrer bei Nachtfahrten in Kurven die Fahrbahn besser auszuleuchten, damit dieser genauso vorausschauend auf die Fahrsituation reagieren kann wie es ihm am Tag möglich ist [106]. Realisiert wird ein solches Kurvenlicht zum Beispiel durch ein schwenkbares Abblendlichtmodul im Scheinwerfer, bei dem ein Schrittmotor den Reflektor oder Linse mitsamt der Lichtquelle um eine vertikale Achse bewegt. Neben diesem dynamischen Kurvenlicht wird beim statischen Kurvenlicht eine zusätzliche Lichtquelle aktiviert, welche den Bereich des Kurveninneren ausleuchtet [107, 108].

Ein dynamisches Kurvenlicht kann ebenso im Fernlichtbereich eingesetzt werden. Für das MatrixBeam System, bei welchem sich die Fernlichtverteilung aus mehreren Segmenten zusammensetzt (vgl. Abschnitt 3.2.1), wird dieses sogenannte synthetische Kurvenlicht durch ein Aufdimmen kurveninnenliegender Segmente umgesetzt, während kurvenäußere Segmente teilweise abgedimmt werden [109]. Somit verschiebt sich der Lichtschwerpunkt in den relevanten Bereich der Straßenumgebung. Eine Erweiterung des dynamischen Kurvenlichts ist das prädiktive Kurvenlicht. Hierbei werden Navigationsdaten zur Vorausschau auf den kommenden Fahrbahnverlauf genutzt, um den Drehwinkel des Scheinwerfers anzupassen bevor der Fahrer eine Lenkbewegung vornimmt. Insbesondere in S-Kurven wird somit vermieden, dass der Lichtkegel aus dem Kurveninneren der zweiten Kurve wegbewegt wird, weil das Fahrzeug und der Lenkwinkel noch an der ersten, entgegengesetzten Kurve orientiert ist [110].

Das Laserscannersystem bietet den Vorteil, ein solches Kurvenlicht im Fernlichtbereich nicht nur synthetisch, sondern durch eine echte Umverteilung des verfügbaren Lichts umzusetzen. Zur Bestimmung der Systemgrenzen und Abwägen des Kompromisses zwischen maximaler Lichtleistung, Öffnungswinkel und Modulkosten ist Kenntnis über den maximalen Winkel der Funktion Kurvenlicht notwendig. GUT et al. haben auf der Basis von Verkehrsraumdaten ermittelt, dass ca. 74 % aller Rechtskurven bzw. 66 % der Linkskurven deutscher Landstraßen mit einem Schwenkwinkel von $\pm 6^\circ$ durch ein dynamisches Kurvenlicht ausgeleuchtet werden können [92].

In Abb. 3.10 sind gemessene Lichtverteilungen des aufgebauten Laserscannersystems dargestellt. Die Verschiebung um $3^\circ$ wird hierbei durch eine veränderte

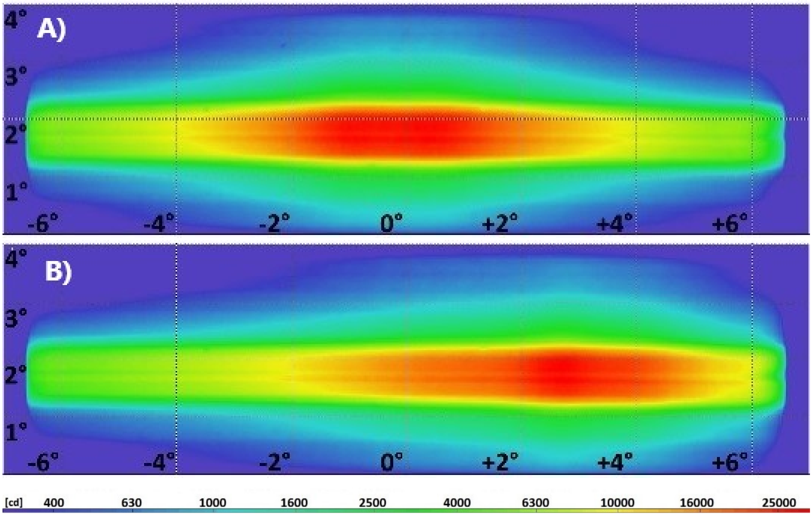



**Abbildung 3.10.:** Falschfarbendarstellung der Lichtverteilung des Laserscannersystems zur Umsetzung der Funktion Kurvenlicht. Die Falschfarben entsprechen der Lichtstärke in Candela. A): Lichtschwerpunkt im Zentrum der Lichtverteilung wie bei Geradeausfahrt (kein dynamisches Kurvenlicht aktiv). B): Lichtschwerpunkt ist um 3° nach rechts verschoben. Aus [73]

Ansteuerungskurve des Mikrospiegels realisiert. Dabei ist es nicht notwendig die Laserlichtquellen zu Dimmen, sodass die Gesamtmenge des emittierten Lichtstroms konstant bleibt. Hervorzuheben ist zudem, dass der Endzustand B) aus Abb. 3.10 nicht ruckartig und damit nicht ablenkend für den Fahrer erreicht wird. Es werden für das Auge nicht-wahrnehmbare Zwischenpositionen der Lichtschwerpunktverschiebung angefahren, sodass die Bewegung des Lichtschwerpunktes sehr gleichmäßig wirkt.

### 3.2.4. AUTOBAHNLICHT

Für baulich getrennte Fahrbahnen, wie sie auf Autobahnen auftreten, bietet das sogenannte Autobahnlicht eine bessere Ausleuchtung der Fahrbahn ohne eine Blendung des Gegenverkehrs. Dabei wird die Hell-Dunkel-Grenze des Abblendlichts durch die Leuchtweitenregulierung angehoben und die Sichtweite für den Fahrer erhöht [111, 112]. Ein weiterer Ansatz des Autobahnlichts im Fernlicht ist das Abdimmen linksseitiger Segmente von Pixelsystemen bzw. Rechts-Schwenken eines mechanischen Systems[2]. Ziel ist auch hier eine verbesserte Ausleuchtung der Fahrbahn ohne den Gegenverkehr hinter der Mittelleitplanke zu blenden.

Die Funktion Autobahnlicht wurde mit dem Laserscannersystem auf eine weitere Art und Weise umgesetzt. In Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Navigationsdaten wird der Öffnungswinkel des Scanners variiert. Da die Systemleistung durch die Laser konstant ist, bewirkt eine Verkleinerung der maximalen Spiegelauslenkung eine Zunahme der maximalen Leuchtdichte auf dem Konverterkristall. Eine solch verschmälerte, dafür intensivierte Lichtverteilung ist auf Autobahnen von Vorteil, da höhere Beleuchtungsstärken auf weiter entfernten Objekten möglich sind. Gleichzeitig wird nur der unmittelbar vorausliegende Fahrbahnbereich intensiv beleuchtet, was häufiger auf Autobahnen mit sehr kleinen Kurvenradien der Fall ist [73].

In Abb. 3.11 ist die Funktion Autobahnlicht im Vergleich zur Grundlichtverteilung des Laserscanners dargestellt. Sowohl die Verringerung des Öffnungs-

[2] Gilt für die Funktionsausprägung in Ländern mit Rechtsverkehr. In Ländern mit Linksverkehr ist die abzudimmende Seite bzw. die Schwenkrichtung entgegengesetzt.

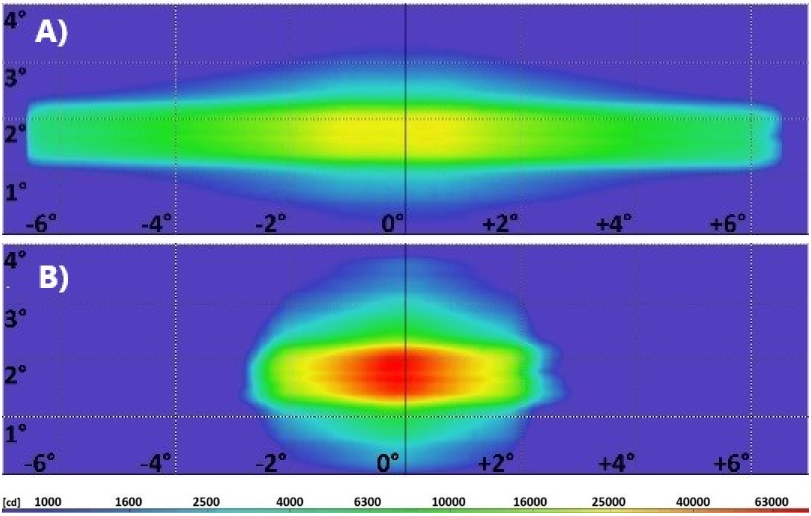



**Abbildung 3.11.:** Falschfarbendarstellung der Lichtverteilung des Laserscannersystems zur Umsetzung der Funktion Autobahnlicht. Die Falschfarben entsprechen der Lichtstärke in Candela. A): Grundlichtverteilung des Laserscanners mit einem Öffnungswinkel vom $\pm 6°$. B): Autobahnlichtverteilung. Der Öffnungswinkel ist auf $\frac{1}{3}$ der Grundlichtverteilung reduziert. Die maximale Lichtstärke steigt um rund das Dreifache an. Aus [73]

winkels der Lichtverteilung von $\pm 6°$ auf $\pm 2°$ aufgrund der entsprechend angepassten Anregung des Mikrospiegels, als auch ist die Zunahme der maximalen Lichtstärke auf das rund Dreifache ist in Abb. 3.11 B) erkennbar. Diese Erhöhung der Lichtstärke ist einzigartig für das Laserscannersystem. Es muss keine optische Leistung vorgehalten werden, um einzelne Winkelbereiche der Fahrzeugumgebung intensiver auszuleuchten, wie es bei allen in Abschnitt 3.2.1 vorgestellten Systemen außer dem phasenmodulierten LCoS der Fall ist.

### 3.2.5. BLENDFREIES FERNLICHT

Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass das blendfreie Fernlicht die am wichtigsten gewordene Lichtassistenzfunktion ist, da die Ausleuchtung der Nachtszenerie mit Fernlicht den größten Sicherheitsgewinn bei Nachtfahrten mit sich bringt [91, 89, 113, 114]. Eine zusammenfassende Übersicht findet sich in [115]. Ziel aller technologischen Ansätze des blendfreien Fernlichts ist es, möglichst häufig das Fernlicht oder Fernlichtbereiche zu aktivieren ohne andere Verkehrsteilnehmer zu blenden. Dies führt vom einfachen Fernlichtassistenten, welcher das gesamte Fernlicht ausschaltet, sobald ein Fahrzeug vor dem eigenen detektiert wird, bis zum hochaufgelösten Pixelsystem, welches nur exakt die Bereiche des Lichtbildes entblendet, in dem sich andere Fahrzeuge befinden.

Zur Umsetzung eines blendfreien Fernlichts mit dem Laserscannerscheinwerfer ist eine Elektronikarchitektur, wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, notwendig. Nach Übermittlung der Objektinformationen an die Laserscanner-interne Ansteuerung des Mikrospiegels und Laserdioden, werden die notwendigen Spiegelpositionen berechnet, in welchen der jeweilige Laserkanal deaktiviert werden muss, um eine Ausblendzone in der Lichtverteilung zu erzeugen.

In Abb. 3.12 ist eine solche Lücke dargestellt. Die Lichtstärken in den ausgeblendeten Regionen betragen 180 cd bis 350 cd und sind damit nach der ECE R123 zulässig für ADB-Systeme (ADB - Adaptive Driving Beam; Teilfernlicht), in welchen die Blendgrenze von 625 cd unterschritten werden muss [105]. Hervorzuheben ist zudem die Verschiebeauflösung von Lücken, wenn sich andere Verkehrsteilnehmer aufgrund der Fahrdynamik durch das Lichtfeld bewegen.

Es tritt bei dem Laserscannersystem kein digitales Schalten auf, welches zu einer Ablenkung oder zumindest einer Komforteinbuße führen kann [116, Kap.6.4]. Im Vergleich zu einem spaltenweisen Ausblenden, wie es beim MatrixBeam der Fall ist, können beim Laserscanner Objekte entlang der horizontalen Achse ausgeblendet werden. Beispiele hierfür sind die Schilderentblendung, bei der Autobahnschilder mit einer verringerten Lichtleistung beleuchtet werden, um eine blendende Reflexion zu vermeiden oder das Entblenden von Fahrzeugen an einer Steigung.

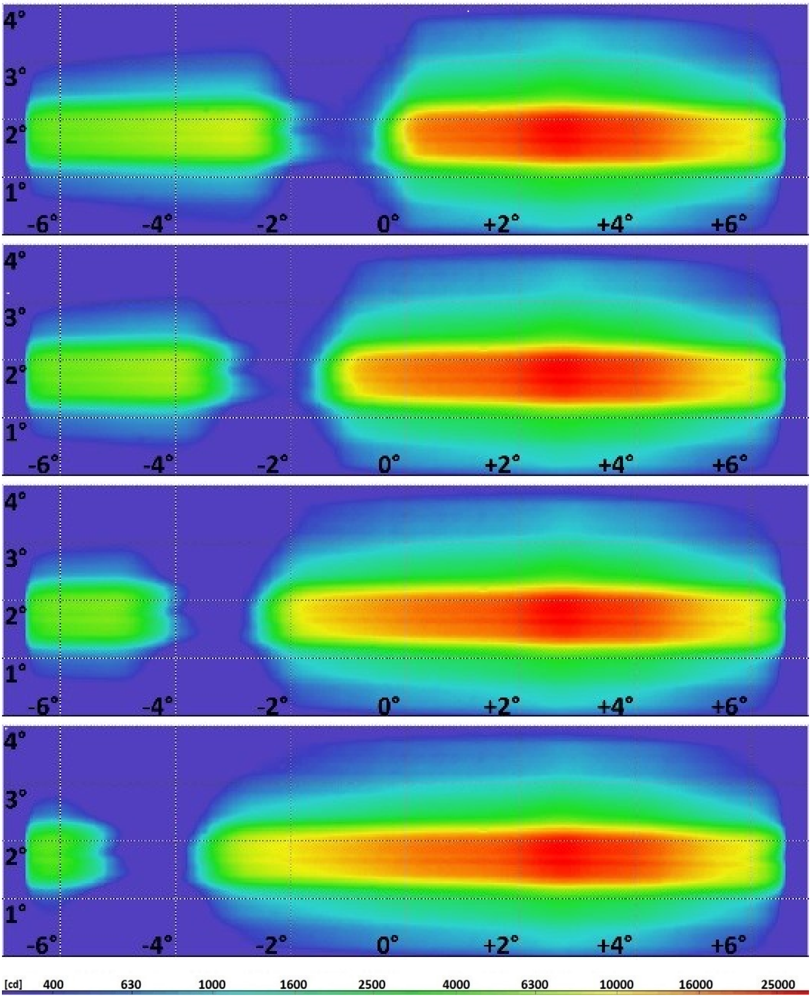



**Abbildung 3.12.:** Falschfarbendarstellung der Lichtverteilung des Laserscannersystems zur Umsetzung der Funktion blendfreies Fernlicht. Die Falschfarben entsprechen der Lichtstärke in Candela. Von oben nach unten: Verschiebung des Entblendungsbereiches um jeweils 1°. Die Lichtstärken in den Lücken sind im Bereich 180 cd bis 350 cd und damit nach ECE R123 zulässig für ADB-Systeme. Aus [73]

## KAPITEL 4

# HOMOGENITÄTSBEWERTUNG VON LICHTFUNKTIONEN

## 4.1. STAND DER TECHNIK

Bereits in der Vergangenheit wurden Konzepte erarbeitet, um das Gütemerkmal der Homogenität in der automobilen Beleuchtung zu bestimmen und möglichst objektiv zu bewerten. Beispielhaft sollen drei von ihnen im Folgenden vorgestellt werden sowie eine Abgrenzung der in dieser Arbeit neu entwickelten Methoden gezeigt werden.

HUPE untersucht in seiner Veröffentlichung die Homogenität von Flächenleuchten wie sie im Heck von Automobilen zu finden sind [41]. Er wendet für seine Analyse bereits bekannte Methoden der Gleichmäßigkeitsbestimmung an, um die Ergebnisse mit subjektiven Eindrücken von Probanden zu vergleichen. Dabei wird ein Gesamtkontrast aus aufgenommenen Leuchtdichtedaten bestimmt, welcher sich aus dem Verhältnis der minimalen Leuchtdichte zur mittleren Leuchtdichte oder aus dem Quotienden der minimalen und maximalen Leuchtdichte der zu untersuchenden Region ergibt.

Weitere Ansätze sind die Bestimmung der Gleichmäßigkeit nach der DIN 5035-8 für die Beleuchtung von Büroarbeitsplätzen oder der ISO 13406-2, in welcher die Gleichmäßigkeit für Flachbildschirme beschrieben ist. Der Nachteil all dieser Ansätze ist die Auswahl der hierfür verwendeten Daten. Bis auf den erstgenannten Gesamtkontrast werden nur Mininal- und Maximalwerte einer ausgedehnten Lichtverteilung in die Bestimmung der Homogenität einbezogen. Somit können keine Gradienten oder Strukturen innerhalb der Leuchtfläche identifiziert und bewertet werden.

Abhilfe kann ein Ansatz aus dem EU-geförderten Forschungsprojekt *OLED100.eu* sein. Hierbei wird die zu untersuchende Fläche in 13 Regionen unterteilt und die jeweiligen Gradienten zwischen diesen Flächen bestimmt [117]. Die begrenzte Anzahl der Regionen kann bei ausgedehnten Leuchtflächen jedoch dazu führen, dass Inhomogenitäten innerhalb einer Region auftreten, welche aufgrund der Nutzung eines einzelnen Messwertes pro Region nicht berücksichtigt werden.

HUPE schließt aus dem Vergleich der Ergebnisse der mathematischen und subjektiven Homogenitätsbewertung, dass vor allem die Einschätzung durch die Probanden sehr abhängig vom Design der Heckleuchte ist [41]. Da es sich hierbei um unterbrochene Leuchtstrukturen handelt, sind die Methodiken nicht geeignet um, die Homogenität von ausgedehnten Scheinwerferlichtverteilungen oder insbesondere des Laserscanners zu bewerten.

LOCHER et al. projizieren in einem Lichtkanal Abblendlichtverteilungen mit Hilfe eines 30 000 lm-Projektors, welche verschiedenen Inhomogenitäten beinhalten. Die vier Typen (dunkler und heller Fleck, Streifen, Ring) der Inhomogenitäten werden dabei in Kontrast, Gradient, Anzahl und Position varriiert und anschließend durch Probanden bezüglich des Grades und Akzeptanz der Inhomogenität bewertet. Ziel der Studie ist die Bestimmung des Einflusses der Variationsparameter für die jeweiligen Inhomogenitäten auf den Grad der Erkennbarkeit und die Akzeptanz.

Dabei zeichnet sich ein veränderter Kontrast als einflussreichstes Merkmal aus. Die subjektive Bewertung des Inhomogenitätsgrades und der Störung durch eine Inhomogenität ist dabei für die verschiedenen Parameter sehr ähnlich. Eine mathematische Beschreibung der Inhomogenitäten bleibt jedoch aus und auch ein Algorithmus zur Übertragung der Ergebnisse auf die Einschätzung der Endkunden kann nicht beschrieben werden [45].

Das Fehlen einer analytischen Beschreibung des Inhomogenitätsgrades zur Bestimmung eines objektiven Homogenitätskriteriums in der Arbeit von LOCHER et al. soll mit den nachfolgend vorgestellten Methoden behoben werden. Vor allem die mathematische Analyse von objektiven Leuchtdichtedaten ist ein zielführender Ansatz, welcher in dieser Arbeit verfolgt werden soll.

KLEINKES et al. konzentrieren sich in ihrer Studie zur Homogenitätsbewertung von Scheinwerfern auf den Abblendlichtbereich vor dem Fahrzeug [46, 118].

Dabei werden 21 Halogen- und Xenonscheinwerferpaare in einem Lichtkanal Probanden vorgeführt und per Leuchtdichtekamera vermessen. Das Vorfeld der Lichtverteilung wird in zehn Felder unterteilt und diese sowie die Gesamtlichtverteillung durch die Probanden einzeln bezüglich der subjektiven Homogenitätseinschätzung bewertet.

Um einen Zusammenhang zwischen den Studienergebnissen und den Messdaten herzustellen wird durch KLEINKES et al. eine Methode zur Homogenitätsbewertung von Leuchtdichtedaten vorgestellt. Die Analyse wird für die ausgewählten zehn Bereiche separat durchgeführt. Zunächst werden die Daten geglättet, um Artefakte durch Unebenheiten der Straßenoberfläche zu entfernen. Nach einer Normierung der Leuchtdichte zwischen den Bereichen und den verschiedenen Scheinwerferpaaren, um die Adaptation des Auges einzubeziehen, wird das Gradientenfeld berechnet. Dabei wird aber nur jede zehnte Zeile einbezogen, da globale Leuchtdichteverläufe detektiert werden sollen, welche Inhomogenitäten verursachen.

Zur Gegenüberstellung mit den Ergebnissen der Probandenstudie ist eine Gütekennziffer für die Inhomogenität der einzelnen Bereiche notwendig. Diese wird aus den Summen der x-Gradienten für das jeweilige Feld bestimmt und mit den Mittelwerten der subjektiven Einschätzungen der Probanden verglichen. Eine Korrelation zwischen dieser Gütekennziffer und den Resultaten der Probandenbefragung kann nachgewiesen werden. Daher lässt die Bestimmung der Homogenitätsgüte nach KLEINKES et al. im Entwicklungsprozess von Scheinwerfern eine Vorhersage über den Homogenitätseindruck des Kunden zu [118].

Die Beschränkung auf bestimmte Bereiche einer Lichtverteillung ist in den folgend vorgestellten Ansätzen nicht notwendig. Zudem kann die Glättung der Daten im ersten Schritt und die Beschränkung auf jede zehnte Zeile bei der Gradientenberechnung dazu führen, dass Artefakte wie Hotspots oder dunkle Flecken nicht detektiert werden, für das menschliche Auge aber wahrnehmbar sind und als störende Inhomogenität empfunden werden.

Die in den folgenden Kapiteln vorgestellten Methoden leiten zwar keine Gütekennziffer ab, welche zum Vergleich des Homogenitätsmaßes verschiendener Lichtverteilungen herangezogen werden kann. Der Vorteil der hier entwickelten Gradientenmethode und Kontrastanalyse ist jedoch die Möglichkeit der Lokalisierung von Inhomogenitäten innerhalb der Gesamtlichtverteilung. Zudem

wird die jeweilige Adaptation des Betrachters einbezogen, welche durch die Normierung von KLEINKES et al., mit dem Ziel der Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Scheinwerfersystemen, verallgemeinert wird.

## 4.2. HOMOGENITÄTSBEWERTUNG HINSICHTLICH GLOBALER STRUKTUREN

Die Überlagerung einzelner Lichtsegmente kann zur Ausprägung periodischer Inhomogenitäten führen. In Abb. 4.1 ist eine solche Lichtverteilung eines Matrix-Beam Systems beispielhaft gezeigt. Deutlich zu erkennen sind die periodischen Inhomogenitäten, welche mit dem Ansatz der Fourieranalyse detektiert und bewertet werden sollen. Grundlage für diesen Ansatz ist eine zweidimensionale Fast Fourier Transformation (FFT), welche Periodizitäten detektieren kann und deren Verlauf mit einer empirischen Grenzfunktion verglichen wird. Erstmals wurde die Methode mit Einführung der MatrixBeam-Technologie Audi-intern entwickelt und im Rahmen dieser Arbeit aufgegriffen und bezüglich der Untersuchung des Laserscannersystems weiterentwickelt [119, 120, 68].

Die Rohdaten einer zu analysierenden Lichtverteilung sind eine Intensitätsverteilung einer Scheinwerferlichtbildes. Ob es sich dabei um die örtlich aufgelöste Leuchtdichte oder Lichtstärke handelt, ist irrelevant.

Die in dieser Arbeit mit einer Leuchtdichtekamera aufgenommenen Daten beinhalten einen größeren Detektionsbereich als der zu untersuchende Teil der Lichtverteilung. Daher wird zunächst der relevante Bereich mit den zu erwartenden periodischen Inhomogenitäten ausgeschnitten. Für die Definition eines Kriteriums für die Grenze des zu untersuchenden Bereiches wird auf die verwendete Lichtquelle eingegangen.

Der Querschnitt einer Laser-Intensitätsverteilung entspricht einer Gaußkurve und der Radius eines Lasers ist definiert als Abstand zum Maximum, bei dem die Intensität auf das $\frac{1}{e^2}$-fache abgefallen ist. Die Intensitätsverteilung des konvertierten Weißlichts entspricht weiterhin einer Gaußkurve, daher wird die Leuchtdichteaufnahme dort abgeschnitten, wo sie auf das $\frac{1}{e^2}$-fache der maximalen Leuchtdichte abgefallen ist.

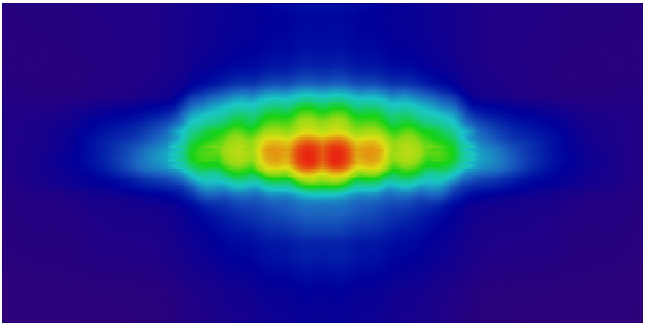


**Abbildung 4.1.:** Beispielhafte Falschfarbendarstellung einer MatrixBeam Lichtverteilung, bestehend aus acht Fernlichtsegmenten. Breite der Aufnhame: ±20°. Deutlich zu erkennen ist die periodische Inhomogenität an den Überlappungsgrenzen zwischen den Segmenten. Aus [119]

Im nächsten Schritt ist es notwendig, dass eine Gewichtung der Daten mit Hilfe einer Fensterfunktion durchgeführt wird. Damit wird der sogenannte Leakage-Effekt vermieden, welcher bei der diskreten Signalverarbeitung mit einer Fouriertransformation auftreten kann. Die Signalmatrix ist endlich und es kann nicht garantiert werden, dass die Werte an allen Rändern auf identische Werte abfallen, da der Ausschnitt ein Rechteck bleibt, die Grenze der $\frac{1}{e^2}$-ten Werte aber nicht am Rand dieses Rechteckt liegen. Die Folge von ungleichen Randwerten sind dann Unstetigkeiten innerhalb der Fouriertransformation, der Leakage-Effekt.

Für das hier vorgestellte Konzept werden zwei Fensterfunktionen betrachtet, das Blackman-Fenster und das Tukey-Fenster. Beide sind in Abb. 4.2 dargestellt. Das Blackman-Fenster schwächt einen relativ großen Anteil der Daten ab, was einen erhöhten Grad an Informationsverlust zur Folge hat. In Bezug auf das Laserscannersystem mit 6 diskreten Laserkanälen bedeutet dies, dass die jeweils äußeren Kanäle gegebenenfalls so stark abgeschwächt werden, dass nur noch die Analyse der zwei zentralen Laserkanälen durchgeführt werden kann.

Dieses Verhalten ist bei dem Tukey-Fenster nicht der Fall, da über einen größeren Bereich die Originaldaten beibehalten werden und nur die Randbereiche beeinflusst werden. Die Breite dieser konstanten Ebene lässt sich über den Varia-

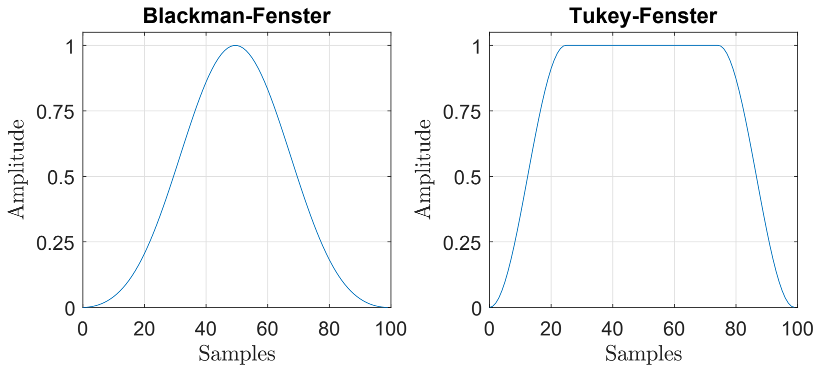



**Abbildung 4.2.:** Fensterfunktionen zur Gewichtung der endlichen Lichtverteilungen. **Links**: Blackman-Fenster. **Rechts**: Tukey-Fenster mit $\alpha = 0,5$

tionsparameter $\alpha$ festlegen und muss so gewählt werden, dass alle relevanten Intensitätsinformationen erhalten bleiben.

Eine Herausforderung stellt die Interpretation der Fouriertransformation bezüglich Frequenzen dar, welche aufgrund starker Intensitätsgradienten auftreten. Dies ist insbesondere bei Scheinwerferlichtverteilungen mit ausgeprägten Hell-Dunkel-Grenzen (HDG) der Fall. Abbildung 4.3 veranschaulicht das Verhalten. Auf der linken Seite sind beispielhafte Intensitätsprofile dargestellt und auf der rechten Seite die jeweils zugehörige Fouriertransformation.

Die Amplitude von Abb. 4.3a entspricht der Inhomogenität einer Scheinwerferlichtverteilung. Deren Fouriertransformierte in Abb. 4.3d zeigt einen Ausschlag aufgrund der Periodizität der Inhomogenität, welcher aber gegebenfalls unterhalb einer zu definierenden Bewertungskurve liegt und damit als nicht störend bewertet wird. Als extremster Gradient ist in Abb. 4.3b beispielhaft eine Rechteckfunktion und deren FFT in Abb. 4.3e gezeigt. Auch hierbei kann die Amplitude der FFT unterhalb einer Bewertungskurve liegen.

Bedingt durch die Linearität der Fouriertransformation entspricht die Superposition der Lichtverteilungen im Realraum (Abb. 4.3c) auch der Addition der FFTs im Frequenzraum (Abb. 4.3f). Das Resultat ist eine FFT, deren niederfrequente Ausschläge nur der HDG zuzuordnen sind (Bereich 1 in Abb. 4.3f) und

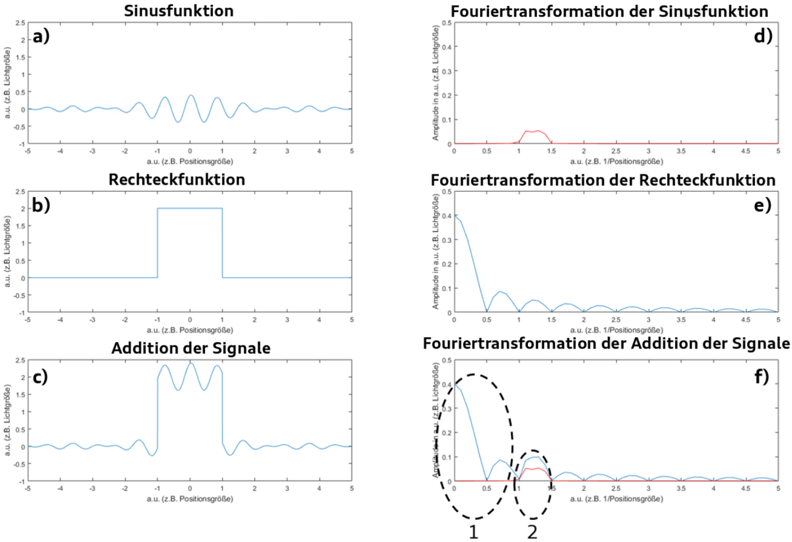



**Abbildung 4.3.:** Beispiel für Interpretationsfehler bei der Fourier-Analyse. Beliebige Einheiten als Achsenbeschriftung; **a-c)**: Darstellung im Realraum, **d-f)**: Darstellung im Frequenzraum. **a)** Sinusfunktion als Modulierung der Lichtverteilung durch Superposition von diskreten Scheinwerferlichtquellen; **b)** Rechteckfunktion als Hell-Dunkel-Grenze am Rand einer Scheinwerferlichtverteilung; **c)** Addition der Signale a) + b) im Realraum; **d)** FFT der Sinusfunktion aus a); **e)** FFT der Rechteckfunktion aus b); **f)** FFT der Summe der Signale. Aus [120]

gegebenenfalls verstärkte Frequenzen, welche nicht nur durch die ursprüngliche periodische Inhomogenität hervorgerufen werden (Bereich 2 in Abb. 4.3f).

Wird nun die FFT einer Lichtverteilung ohne entsprechende Beachtung der Eigenschaften des Lichtbildes und Fouriertransformation interpretiert, so kann das Ergebnis als inakzeptabel gelten obwohl die systembedingte Störung bzw. Periodizität aus den Ausgangsdaten das Homogenitätskriterium erfüllt.

In Betrachtung dessen bringen beide Fensterfunktionen zur Glättung der Daten im Randbereich als Vorbereitung für die FFT Vor- und Nachteile mit sich. Für den hier vorgestellten Ansatz zur Bewertung von Laserscanner-Lichtverteilungen wird ein Tukey-Fenster gewählt. Der Variationsparameter $\alpha$ wird für beide Ori-

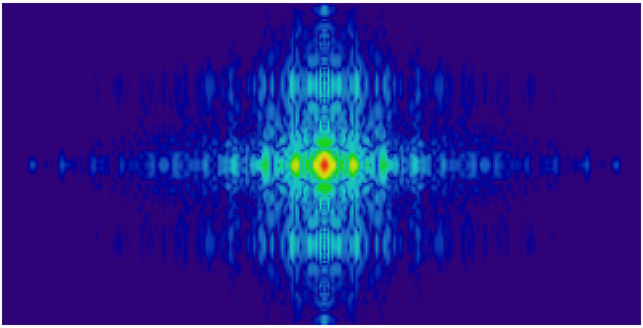


**Abbildung 4.4.:** Zweidimensionale FFT der MxB-Lichtverteilung aus Abb. 4.1. Die Dimensionen der Achsen entsprechen denen der Originaldaten, nur im reziproken Raum ($1\,\frac{1}{\circ}$). Die Falschfarbendarstellung entspricht der Amplitude der FFT. Aus [119]

entierungen der Daten so gesetzt, dass nur Randpixel der Lichtverteilung durch die Faltung in Richtung des Wertes 0 gewichtet werden. Wie oben beschrieben wurde der Ausschnitt der Rohdaten bereits auf das $\frac{1}{e^2}$-fache des Leuchtdichtemaximums begrenzt. Daher ergibt die Anwendung des Tukey-Fensters keine zusätzlichen Artefakte in der Lichtverteilung, wie in Abb. 4.3 beschrieben.

Nach Abschluss der Datenaufbereitung wird die zweidimensionale FFT durchgeführt, deren Resultat für das Beispiel MatrixBeam in Abb. 4.4 gezeigt ist. Von Interesse ist der Schnitt durch das Zentrum, welcher in Abb. 4.5 dargestellt ist. Hier liegen die Informationen über die auftretenden Frequenzen im Realraum. Dieser Schnitt wird auf 1 normiert, um eine Vergleichbarkeit von verschiedenen Lichtverteilungen variabler Intensitäten herzustellen.

Zur Analyse, ob eine periodische Inhomogenität zu stark ausgeprägt ist und als akzeptabel gilt, wird der normierte FFT-Schnitt mit einer Bewertungsfunktion verglichen. Diese Bewertungsfunktion wurde empirisch aus der Analyse verschiedener homogener Lichtverteilungen von Halogen- und Xenon-Scheinwerferlichtverteilungen ermittelt [119].

Bezogen auf das Beispiel des MatrixBeams zeigt sich in Abb. 4.5, dass es eine Überschreitung der Bewertungsfunktion gibt. Diese liegt im reziproken Raum bei $\approx 0{,}44\,\frac{1}{\circ}$, was einer Periodizität im Realraum (Winkelraum) von $\approx 2{,}3^\circ$

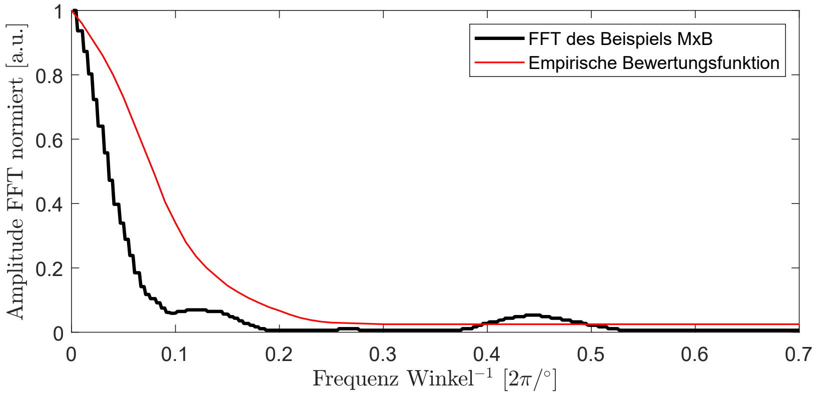



**Abbildung 4.5.:** Schnitt durch das Zentrum von Abb. 4.4 parallel zur y-Achse (schwarz). Der Peak bei $\approx 0,44$ entspricht einer Periodizität von $\approx$ 2,3° im Realraum, was im Vergleich mit Abb. 4.1 plausibel ist. Der Vergleich mit der empirischen Bewertungsfunktion (rot) zeigt, dass der Ausschlag aufgrund der periodischen Inhomogenität inakzeptabel ist.

entspricht. Verglichen mit der Lichtverteilung in Abb. 4.1 ist dieser Ausschlag plausibel, da die Segmentbreite rund 2,3° beträgt.

Die Homogenitätsbewertung mittels Analyse der Fouriertransformation einer Lichtverteilung ist somit durchführbar. Sie kann aufgrund ihrer Natur allerdings nur globale, periodische Inhomogenitäten innerhalb von Lichtverteilungen aufzeigen. Lokale, gegebenenfalls ebenso störende und inakzeptable Inhomogenitäten werden nicht detektiert. Daher wird im nächsten Schritt ein Ansatz zur Homogenitätsbewertung mittels Gradientenanalyse vorgestellt.

## 4.3. Homogenitätsbewertung von lokalen Artefakten

### Gradientenanalyse

Eine Inhomogenität kann als wahrnehmbarer Gradient der Leuchtdichte definiert werden. Um eine im Vergleich zur Fourieranalyse ortsaufgelöste Bewertung

einer Lichtverteilung zu erhalten, wird daher im folgenden Ansatz der lokale Leuchtdichtegradient ermittelt und anschließend mit der Weber-Fechner-Kurve verglichen. Eine ausführliche Beschreibung ist in einem im Rahmen dieser Arbeit betreuten Bachelorarbeitsprojekt zu finden [121].

Die zu analysierenden Leuchtdichtedaten liegen in einem zweidimensionalen, kartesischen Koordinatensystem vor. Der zu bestimmende Gradient für jeden Pixel entspricht daher der partiellen Ableitung entlang der Raumrichtungen. Es resultiert ein Vektor, welcher in die Richtung der größten Intensitätsdifferenz zeigt und dessen Betrag dem Wert dieser Differenz entspricht.

In Abb. 4.6 ist die Anwendung auf die diskrete Signalmatrix skizziert. Der zu verwendende Pixelbereich, der Radius $R_{\text{grad}}$ in welchem die Datenpunkte für die Gradientenberechnung betrachtet werden, kann variiert werden, um die Auflösung der Daten mit dem Auflösungsvermögen des menschlichen Auges abzustimmen.

Da die Grenzauflösung, bei der das Auge zwei Punkte gerade noch voneinander unterscheiden kann, bei $25''$ bis $60''$ liegt, sollten die Daten mit einer Auflösung von $0{,}04^\circ$ bis $0{,}016^\circ$ aufgenommen werden [122]. Andernfalls müssen die Leuchtdichematrizen entweder geglättet oder interpoliert werden. Bei beiden Verfahren besteht die Gefahr, dass Informationen in der Lichtverteilung entweder vom Auge noch wahrnehmbar sind während die Messdaten zu grob sind oder Messartefakte auftreten, die das Auge nicht wahrnehmen kann.

Die rechnerbasierte Auswertung der diskreten Datenmatrix $D$ erfolgt durch die Faltung der Matrix mit einem linearen Bildoperator. Für die Gradientenberechnung wird hierfür der *Central-Operator* $h_{cen}$ verwendet, wie in Abb. 4.7 gezeigt. Das Gradientenbild $G_{cen}$ ergibt sich dann zu

$$G_{cen} = |h_{cen} * *D| \,. \tag{4.1}$$

Damit beinhaltet die Matrix $G_{cen}$ den jeweils maximalen Leuchtdichteunterschied $\Delta L$ für jede ortsaufgelöste Position der Lichtverteilung. Für den Vergleich der Daten mit der Weber-Fechner-Kurve ist die Adaptationsleuchtdichte $L_{\text{adap}}$ am jeweils zu analysierenden Punkt zu bestimmen. Hierfür wird der Mittelwert der Leuchtdichten aller Pixel im Radius $R_{\text{grad}}$ gebildet. Damit wird angenommen, dass die Adaptation des Auges sehr lokal auf den fokussierten Bereich abläuft. Diese Annahme soll später noch untersucht werden.

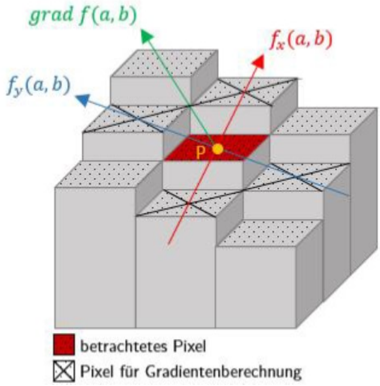



**Abbildung 4.6.:** Schematische Darstellung des Gradienten einer diskreten Signalmatrix. Aus [121]

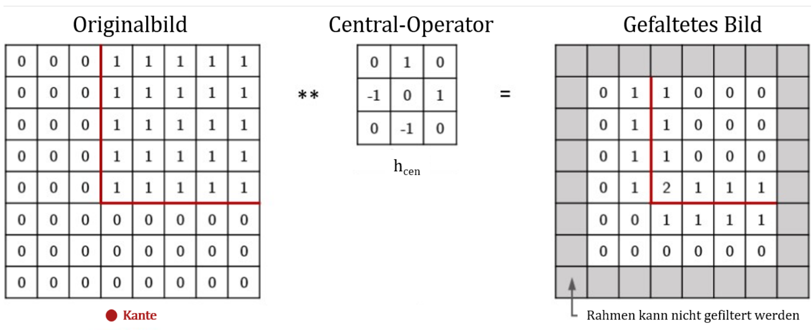



**Abbildung 4.7.:** Beispielhafte Gradientenberechnung einer diskreten Signalmatrix mit Hilfe des Central-Operators für die beiden Raumrichtungen. Aus [121]

Die Faltung der Datenmatrix mit den Central-Operatoren erfolgt entlang der Raumachsen. Damit werden bei der Berechnung des jeweiligen Gradienten allerdings diagonale Pixel ignoriert, wie in Abb. 4.6 gezeigt. Das Auge nimmt jedoch richtungsunabhängig Leuchtdichteunterschiede wahr, somit sind auch Unterschiede diagonaler Pixel innerhalb des Auflösungsvermögens des Auges sichtbar und können als erkennbare Inhomogenität gelten. Daher wird im Folgenden als Variante der Gradientenanalyse das Konzept der Kontrastwahrnehmung als Bewertungsmethode für lokale Inhomogenitäten vorgestellt.

### KONTRASTWAHRNEHMUNG

Die kleinste Inhomogenität einer Lichtverteilung ist ein lokaler, wahrnehmbarer Kontrast. Diese begegnen uns beispielsweise bei defekten Pixeln von Bildschirmen. Im folgenden Ansatz soll daher die Leuchtdichteverteilung auf lokale Kontraste und deren Wahrnehmbarkeit bezogen auf die Weber-Fechner-Kurve untersucht werden. Wie in Abschnitt 4.3 beschrieben ist auch hier wichtig, dass die Auflösung der aufgenommen Leuchtdichtedaten einer ähnlichen Größenordnung entspricht wie das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges. Grundlagen dieser Methodik wurden im Rahmen einer Masterarbeit entwickelt [123].

Um die Wahrnehmbarkeit nach der Weber-Fechner-Kurve zu bestimmen, muss für jeden Punkt der Lichtverteillung der adaptionsabhängige Leuchtdichteunterschied $\frac{\Delta L}{L}$ bestimmt werden:

$$\frac{\Delta L}{L} = \left| \frac{L_{\mathrm{adap}} - L_{\mathrm{DUT}}}{L_{\mathrm{adap}}} \right|. \tag{4.2}$$

Dabei ist $L_{\mathrm{adap}}$ die Adaptationsleuchtdichte und $L_{\mathrm{DUT}}$ die Leuchtdichte des zu bewertenden Pixels. Bei passender Datenauflösung (Pixelabstand $\equiv$ Auflösungsvermögen Auge) werden für jeden ortsaufgelösten Bewertungsschritt neun Pixel im Quadrat betrachtet. Das Zentrum dieses Quadrats ist der zu bewertende Punkt $L_{\mathrm{DUT}}$ in der Leuchtdichteverteilung.

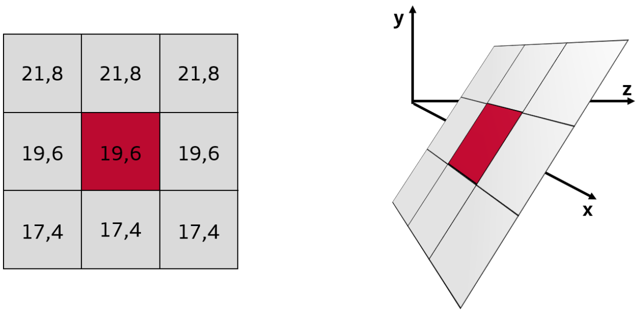



**Abbildung 4.8.:** Skizze zur Veranschaulichung des systematischen Fehlers der Bestimmung der mittleren Leuchtdichte. Der lineare Verlauf der Leuchtdichteverteilung führt zu $L_{\text{adap}} = 19{,}6\,\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$. Folglich ist die Leuchtdichtedifferenz zum Bewertungspixel $\Delta L = 0\,\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$, was einem Widerspruch zur offensichtlichen Inhomogenität entspricht.

Zur Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte wird die mittlere Leuchtdichte des Quadrats bestimmt. Hierbei kann es zu einem systematischen Fehler kommen. Sollten alle Pixel auf einer gleichmäßig abfallenden Fläche liegen, so kann sich eine Adaptationsleuchtdichte ergeben, die dem zu analysierenden Pixel entspricht und die Leuchtdichtendifferenz $\Delta L = 0\,\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ beträgt.

In Abb. 4.8 ist das Phänomen noch einmal dargestellt. Aufgrund des linearen Leuchtdichtegefälles beträgt die mittlere Leuchtdichte $L_{\text{adap}} = 19{,}6\,\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ und ist damit identisch mit der zu vergleichenden Leuchtdichte $L_{\text{DUT}} = 19{,}6\,\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$, weswegen $\Delta L = 0\,\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$. Da aber offensichtlich eine Leuchtdichtendifferenz vorliegt, muss ein Ansatz gewählt werden, der diesen systematischen Fehler entfernt.

Es ist zu erwarten, dass die Daten zur Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte normalverteilt vorliegen. Der Erwartungswert ist allerdings nicht das Mittel der Leuchtdichten, sondern das lokale Maximum der Intensität, da die Photorezeptoren des Auges auf einen vorhandenen Lichtreiz adaptieren [124, Kap.15]. Für die Standardabweichung von $\sigma = 1$ werden daher rund 68,3 % der höchsten Leuchtdichten im zu bewerteten Bereich für die Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte $L_{\text{adap}}$ herangezogen [125].

Die Bestimmung von $\frac{\Delta L}{L}$ wird für jedes Pixel der Leuchtdichtematrix durchgeführt und anschließend mit dem Wert der Weber-Fechner-Kurve (vgl. Abb. 2.5) verglichen. Punkte oberhalb der Kurve werden als inhomogen markiert, wäh-

rend Werte unterhalb der Weber-Fechner-Kurve als Kontraste identifiziert werden, welche nicht durch das menschliche Auge wahrgenommen werden können und somit nicht als eine Inhomogenität zählen. Das Ergebnis des Ansatzes der Kontrastwahrnehmung ist eine ortsaufgelöste Homogenitätsbeurteilung einer Leuchtdichteverteilung.

Neben der Gradientenanalyse setzt auch die Bewertung der Kontrastwahrnehmung die Annahme voraus, dass das menschliche Auge in dem lokalen Bereich auf die vorliegende Leuchtdichte adaptiert, auf welchen es fokussiert ist und eine Inhomogenität wahrnehmen könnte. Es muss daher untersucht werden, ob diese Annahme gültig ist oder verworfen werden muss. Eine im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Studie ist in Abschnitt 5.1 beschrieben.

## Kapitel 5

# Physiologische Bewertung eines Laserscannersystems bezüglich der Homogenität

## 5.1. Untersuchung zum Adaptationsverhalten des Auges

In den Ansätzen der lokalen Gradienten- und Kontrastbewertung wurde die Annahme getroffen, dass die Adaptationsleuchtdichte für jede bewertete Position einer Lichtverteilung aus der direkten Umgebung dieser Position abgeleitet werden kann. Da es keinen allgemeingültigen Beweis für diese Aussage gibt, muss daher die Annahme mit Hilfe einer wissenschaftlichen Studie plausibilisiert oder falsifiziert werden.

Zur Untersuchung dieser Fragestellung soll eine Probandenstudie durchgeführt werden. Ziel ist die Ermittlung des Schwellenkontrasts in Abhängigkeit der variierenden Größe einer leuchtenden Fläche um ein Fokusfeld, in welchem Reize in Form von Inhomogenitäten dargeboten werden.

Der Schwellenwert ist definiert als die Reizstärke, bei der die Erkennungsrate durch die Probanden den Wert 50 % gerade übersteigt [126]. Zur empirischen Bestimmung dieses Schwellenwertes gibt es verschiedene in der Literatur bereits eingehend beschriebene Ansätze, wie die Grenzmethode oder die Herstellungsmethode [127].

In dieser Arbeit wird die Konstanzmethode angewendet. Dabei werden mehrfach Reize in einem ausreichend großen Intervall vom 0-Reiz in zufälliger Reihenfolge dargeboten. Da es sich bei den hier betrachteten Reizen um Inhomogenitäten mit Leuchtdichtedifferenzen zum Hintergrund handelt, ist der 0-Reiz

der Fall, in welchem keine Inhomogenität dargestellt wird bzw. die Inhomogenität die gleiche Leuchtdichte besitzt wie die Hintergrundfläche. Aus der Befragung der Probanden, ob ein Reiz erkannt wurde oder nicht, kann dann der Schwellenwert bestimmt werden. Die Vorteile dieser Konstanzmethode sind die Zuverlässigkeit und Präzision der Ergebnisse bei vergleichsweise geringem technischem Aufwand [128, 126, 127].

Alle Leuchtdichteaufnahmen wurden mit einer *LMK5-1 Color* der Firma TECHNOTEAM BILDVERARBEITUNG GMBH durchgeführt. Die Studie entstand im Rahmen eines Praktikums, welches im Rahmen dieser Arbeit betreut wurde [129].

### 5.1.1. STUDIENDESIGN / METHODISCHES VORGEHEN

Zur Versuchsdurchführung der Studie wurde das Lichtassistenzzentrum (LAZ) der AUDI AG in Ingolstadt genutzt. Mit einem Beamer wurden auf einer Leinwand von $12,5 \times 6,5\,\mathrm{m}^2$ Lichtverteilungen projiziert, welche jeder Proband in einem Abstand von 10 m sitzend beobachtet hat. Der Versuchsraum stellte keine kalibrierte Messumgebung dar,weil beispielsweise die Reflexionseigenschaften der Projektionsflächen nicht definiert sind sowie Lichtquellen außerhalb des Sichtbereichs der Probanden (z.B. Fluchtwegkennzeichen) einen Lichtstrom im Raum erzeugen. Absolute Leuchtdichtemessungen werden daher in vermessenen Lichtlaboren vorgenommen. Für die hier durchzuführende Probandenstudie ist das Lichtassistenzzentrum dennoch geeignet, da die Umgebungsbedingungen über den Durchführungszeitraum konstant waren und kontrollierte sowie reproduzierbare Ergebnisse erhoben werden konnten.

Als Projektionssystem wurde ein DMD-Beamer HDX-W1x der Firma Barco GmbH genutzt. Helligkeiten werden vom Projektor in einer 8-bit Auflösung eingestellt. Die darzustellenden Lichtverteilungen werden daher in Graustufen von 0 bis 255 generiert. Vermessungen des Beamers zeigen, dass die Leuchtdichte der Projektion nicht über die gesamte Fläche der Leinwand konstant ist. Grund dafür ist die systematisch bedingte ungleichmäßige Ausleuchtung des DMD-Chips.

In Abb. 5.1 sind beispielhaft die Leuchtdichtebilder der maximalen und halben Helligkeit des Beamers sowie Schnitte der Aufnahmen gezeigt. Es wird deutlich, dass die Leuchtdichte zum Rand der Verteilung signifikant abnimmt. Für die Graustufe 255 $\rightarrow$ 46 % und für 130 $\rightarrow$ 51 %. Dies weißt auf einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen den Graustufen und der Leuchtdichte der Beamerprojektion hin uns soll später genauer untersucht werden.

Für die Darbietung der Reize wird daher ein zentraler Bereich der Projektion (vgl. ROI in Abb. 5.1 rechts) definiert, welcher die Größe von $790 \times 430\,\text{px}^2$ hat. Für diesen wurde die mittlere Leuchtdichte und deren Streuung sowie das Verhältnis der maximalen Leuchtdichtendifferenzen innerhalb der Region bestimmt. Die Werte sind in Abb. 5.2 graphisch dargestellt. Die mittlere Streuung beträgt 4,1 % und die mittlere Differenz zwischen maximaler und minimaler Leuchtdichte beträgt 20 %.

Da die dargebotenen Reize als Grauwert-Differenz eingestellt werden und in einem näherungsweise linearen Bereich der Kurve (Graustufe 178-230) aus Abb. 5.2 liegt, ist der systematische Fehler durch den Projektor zu vernachlässigen. Zusätzlich wurde in einer Vorstudie der inhomogene Leuchtdichtenverlauf des Beamers korrigiert, indem eine inverse Graustufenverteilung als Beamer-Input projiziert werden sollte. Dabei wurden im Vergleich zu einer unkorrigierten, gleichmäßigen Graustufenverteilung jedoch alle korrigierten Projektionen als erkennbar sowie ablenkend und störend von einer zusätzlich dargebotenen Inhomogenität bewertet.

Für die durchzuführende Studie wurde ein *within-subject-Design* gewählt. Das bedeutet, jedem Probanden werden alle Situationen vorgeführt. Der Versuch wird mit Wiederholungen geplant, sodass jeder Proband jeden Reiz zweimal bewerten muss. Persönliche Unterschiede der Wahrnehmung wirken sich auf alle Situationen gleichermaßen aus und werden durch die Mittelung über das Probandenkollektiv minimiert. Es können Positionseffekte der dargebotenen Situationen auftreten. Um dies zu vermeiden wird die Reihenfolge der dargebotenen Reize (Größe der peripheren Fläche, Position der Inhomogenität, Leuchtdichtedifferenz der Inhomogenität) für jeden Probanden randomisiert, sodass keine zwei Probanden einen identischen Ablauf des Versuchs erleben [130].

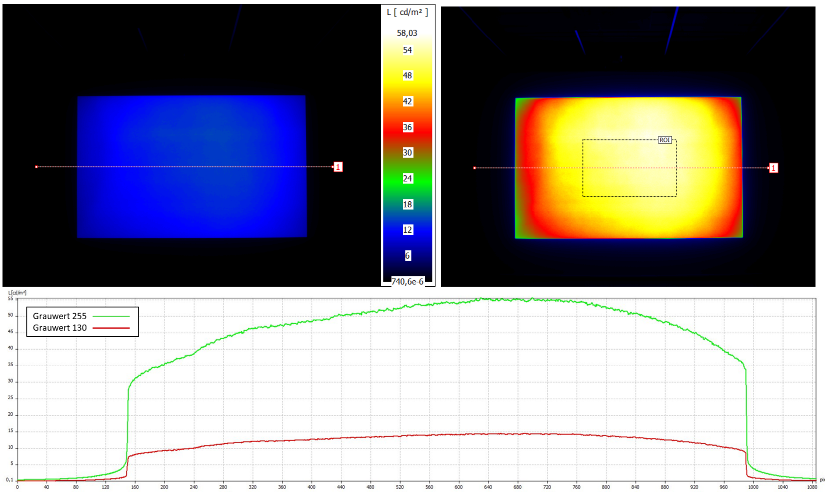



**Abbildung 5.1.:** Leuchtdichteverteilungen in Falschfarbendarstellung des DMD-Projektors für die beiden Graustufenwerte 130 (links) und 255 (rechts) mit gemeinsamer, linearer Skalierung. Die Graustufen entsprechen circa der halben und maximalen Helligkeit. Ein inhomogener Leuchtdichteverlauf ist im Querschnitt deutlich erkennbar. **Unten**: Zur Verdeutlichung zwei Schnitte durch die Leuchtdichteverteilungen. Die Abnahme der Leuchtdichte vom Maximum zur Kante beträgt für die Graustufe 255 → 46 % und für 130 → 51 %.

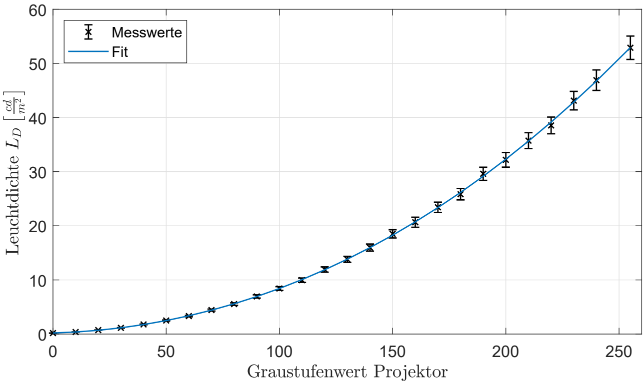



**Abbildung 5.2.:** Mittlere Leuchtdichten des relevanten Bereichs der Studie (ROI aus Abb. 5.1) in Abhängigkeit der einstellbaren Graustufenwerte des Projektors. Die Fehlerindikatoren entsprechen der Streuung der Leuchtdichten um den Mittelwert. Der Fit mit einem Polynom dritten Grades zeigt, dass die Leuchtdichten nicht proportional zum eingestellten Graustufenwert verlaufen.

Zur Schwellenkontrast-Bestimmung werden den Probanden Inhomogenitäten (= Reize) mit einer variierten maximalen Leuchtdichtedifferenz vom Hintergrund dargeboten. Die Inhomogenitäten entsprechen einem Kreis mit einer Winkelausdehnung für den Probanden von 2° in Anlehnung an den CIE1931-Normalbetrachter [131]. Die Inhomogenitäten haben eine Intensitätsverteilung eines rotationssymmetrischen Gaußprofils.

Die eingestellte Leuchtdichtendifferenz wird zwischen dem Maximum der Inhomogenität in deren Zentrum zum Hintergrund (ROI in Abb. 5.1) bestimmt. Um sowohl hellere als auch dunklere Inhomogenitäten darzubieten, wird die Helligkeit der Hintergrundfläche auf 80 % (Graustufe 204) eingestellt. Dies entspricht, abgeleitet aus der Anpassungskurve aus Abb. 5.2, einer Leuchtdichte von 33,6 $\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$.

Für die Überprüfung der Fragestellung muss der Schwellenkontrast für verschiedene Umfeldbedingungen um den Bereich der Reizdarbietung ermittelt werden. Hierfür wird die Fläche der Hintergrundausleuchtung variiert. Der kleinste Bereich entspricht der Region, in der die Reize dargeboten werden (ROI). Die maximale Hintergrundfläche wird in einer Größe von $1690 \times 1060\text{px}^2$

ausgeleuchtet. Die Helligkeit des Hintergrunds bleibt bei allen Größen konstant auf 80 % eingestellt.

### 5.1.2. STUDIENDURCHFÜHRUNG

Zu Beginn der Studie wird jedem Probanden der Fragebogen vorgelegt, auf welchem er allgemeine Angaben zur Person gemacht hat. Ebenso ist auf dem Fragebogen die Versuchsdurchführung schriftlich formuliert. Anschließend nimmt der Proband auf einem Stuhl in einem Abstand von 10 m von der Leinwand entfernt Platz und bekommt vom Versuchsleiter noch einmal den Ablauf und seine Aufgabe erklärt.

Um Lerneffekte zu minimieren und sicher zu stellen, dass kein Proband von der Aufgabe während der ersten Reize überfordert ist, werden Beispiellichtverteilungen dargeboten, welche nicht in die Bewertung einfließen. Zunächst wird die kleinste Leuchtfläche gezeigt, da diese gleichzeitig der Bereich ist, in dem die Inhomogenitäten dargeboten werden und worauf der Proband seinen Fokus legen soll. Des Weiteren wird eine beispielhafte, deutlich vom Hintergrund differenzierte Inhomogenität gezeigt, damit dem Probanden Größe, Form und Intensitätsverlauf (kein harter Kantenkontrast) bekannt sind.

Der Versuchsleiter weist darauf hin, dass es im Bezug zum Hintergrund helle und dunkle Inhomogenitäten gibt. Zudem wird immer nur eine Inhomogenität dargeboten. Die Aufgabe des Probanden besteht darin, eine erkannte Inhomogenität als HELL, DUNKEL zu benennen oder zu VERNEINEN, wenn keine Inhomogenität erkennbar ist.

Nach der Einführung werden die Lichtverteilungen vorgeführt und die Antworten der Probanden durch den Versuchsleiter tabellarisch erfasst. Dabei wird notiert, ob der Reiz gesehen wurde und ob die Art (HELL oder DUNKEL) richtig erkannt wurde.

Die Inhomogenitäten werden in 20 Blöcken je 21 Situationen präsentiert. Die 21 Bilder je Block ergeben sich aus 9 hellen und 9 dunklen Inhomogenitäten verschiedener Leuchtdichtedifferenzen und 3 Situationen, in denen keine Inhomogenität dargestellt ist. Letztere dienen als Kontrollinstanz, um Ergebnisse zu

filtern, da es außer der HELL/DUNKEL-Benennung keine Kontrollaufgabe gibt, ob eine Inhomogenität korrekt erkannt wird oder mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % erraten wird.

Wie oben beschrieben werden die 21 Bilder für jeden Block und jeden Probanden in anderer, zufälliger Reihenfolge angeordnet. Die 20 Blöcke ergeben sich aus den 10 verschiedenen Flächengrößen der Hintergrundausleuchtung, welche wiederholt werden. Die Reihenfolge der Blöcke ist ebenso über das gesamte Probandenkollektiv randomisiert. Die 21 Situationen eines Blockes werden jedoch gemeinsam dargeboten, ehe die Variation der Hintergrundfläche eintritt. Vor jedem Wechsel des Blockes wird dem Probanden eine Lichtverteilung ohne Inhomogenität gezeigt, damit er sich an die neue Größe gewöhnen kann. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass die Wechsel zwischen den Hintergrundflächen zu Verwirrungen und Ablenkung vom Fokusbereich (ROI) führen.

Zwischen 2 Situationen mit unterschiedlichen Inhomogenitäten wird jeweils ein schwarzer Hintergrund präsentiert. Damit werden dynamische Effekte, wie das Verschwinden oder Springen von Inhomogenitäten vermieden. Diese würden eine Erkennung erleichtern, jedoch die Ergebnisse bezüglich der Wahrnehmungsschwelle von Inhomogenitäten verzerren.

Jeder Reiz wird 2,5 s dargeboten. Jeweils 1 s ist der schwarze Hintergrund gezeigt. Die Abfolge der Bilder wird automatisiert, sodass die Gesamtzeit des Versuchs 26,5 min beträgt. Mit einer Einführung von rund 3 min ist die Studie für jeden Probanden nach einer halben Stunde beendet. Dieser Zeitraum erweist sich aus der Erfahrung verschiedener Probandenstudien im Rahmen der Lichtentwicklung bei Audi als ideal, sowohl zur Planung der Termine als auch für die Motivation und Konzentration der einzelnen Probanden.

### 5.1.3. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Das Probandenkollektiv der durchgeführten Studie hat eine Größe von 35 Personen. Circa die Hälfte der Probanden liegen im Altersintervall von 28 bis 35 Jahren, der Frauenanteil liegt bei 17 %. Probanden, welche eine Sehhilfe be-

nötigen, wurden zur Versuchsdurchführung nur unter Nutzung der Sehhilfe zugelassen.

Über alle Probanden wurde die Erkennungsrate der dargebotenen Inhomogenitäten für die Reizintensität sowie für die Größe der umgebenden Leuchtfläche bestimmt. Um nach der Konstanzmethode die 50 %-Schwelle zu ermitteln, müssen zunächst die Leuchtdichtedifferenzen der dargebotenen Reize zum Hintergrund gemessen werden. Hierzu wurden Leuchtdichteaufnahmen der dargebotenen Inhomogenitäten im Zentrum der Leinwand in einem Abstand von 6,86 m für eine ideale Wahl des Objektivs gemacht. Die Ergebnisse werden am Ende dieses Kapitels beschrieben.

Die erwartete Verteilung der Erkennungsraten in Abhängigkeit der Reizstärke wird für die Konstanzmethode durch eine Sigmoidfunktion beschrieben.

$$\mathrm{sig}(x) = \frac{1}{1 + \alpha * e^{(-x*\beta)}} \tag{5.1}$$

Hierbei sind $\alpha$ und $\beta$ Parameter zur Positionierung und Streckung der Funktion und werden im nächsten Schritt an die Resultate der Probandenstudie angepasst. Für den Bereich von $1390 \times 850\,\mathrm{px}^2$ ist das Ergebnis beispielhaft in Abb. 5.3 gezeigt. Aus der angenäherten Sigmoidfunktion lässt sich die Leuchtdichtedifferenz bestimmen, bei der eine Erkennungsrate von 50 % erreicht wäre. Diese spiegelt die gesuchte Schwelle für die entsprechende Umfeldbeleuchtung wider.

In Abb. 5.4 sind die Schwellenleuchtdichten für eine jeweilige Erkennungsrate von 50 % bei den variierten Umfeldbeleuchtungen aufgetragen. Die Fehleranalyse beruht auf der Qualität der Annäherung von $\alpha$ und $\beta$ an die vorhandenen Studienergebnisse. Aus einem 95-prozentigem Konfidenzintervall beim Fit und der t-Verteilung mit 7 Freiheitsgraden wurde der Standardfehler von $\alpha$ und $\beta$ bestimmt. Die Fehlerfortpflanzung resultiert in den aufgetragenen Fehlerintervallen. Es wird deutlich, dass die bestimmten Schwellenleuchtdichten keine Tendenz in Abhängigkeit der Umfeldbeleuchtung aufweisen. Die Streuung der Ergebnisse liegt innerhalb der Fehlerintervalle.

Um die Fehlerquelle des logistischen Fits zu eliminieren, werden im Folgenden weitere Ergebnisse verschiedener statistischer Methoden diskutiert. Aufgrund

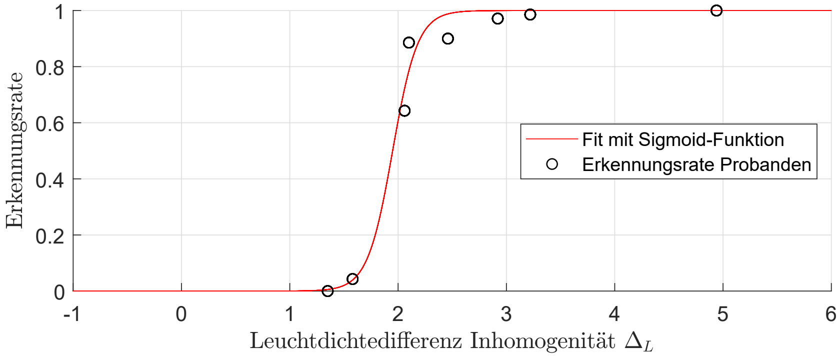



**Abbildung 5.3.:** Verteilung der Erkennungsraten verschieden intensiver Inhomogenitäten über alle Probanden für den Hintergrund von 1390 × 850 Pixeln. Für die Konstanzmethode werden die Daten mit einer Sigmoidfunktion angenähert, um den 50 %-Punkt zu bestimmen.

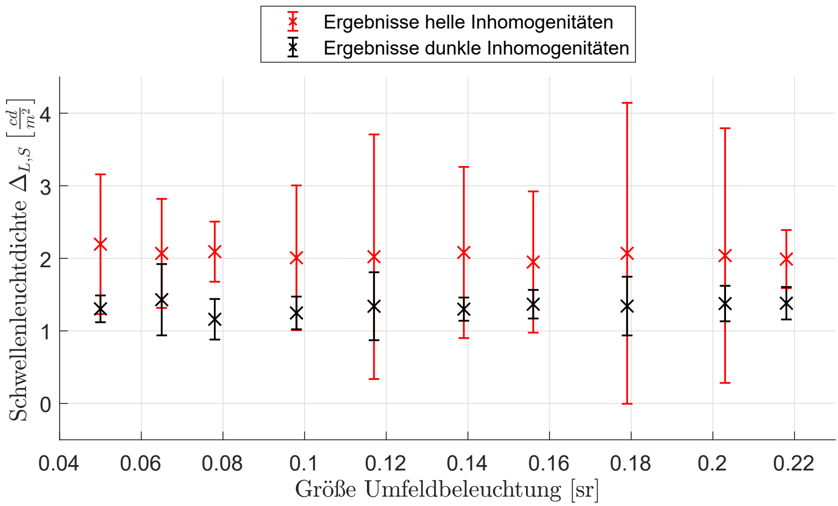



**Abbildung 5.4.:** Ergebnisse der Probandenstudie. Als Auswertungsmethodik wurden die Erkennungsraten von 50 % über den Fit einer logistischen Funktion an die Studienergebnisse bestimmt. Der Verlauf der Schwellenleuchtdichten liegt für helle (rot) und dunkle (schwarz) Inhomogenitäten innerhalb der Fehlerintervalle aller Ergebnisse.

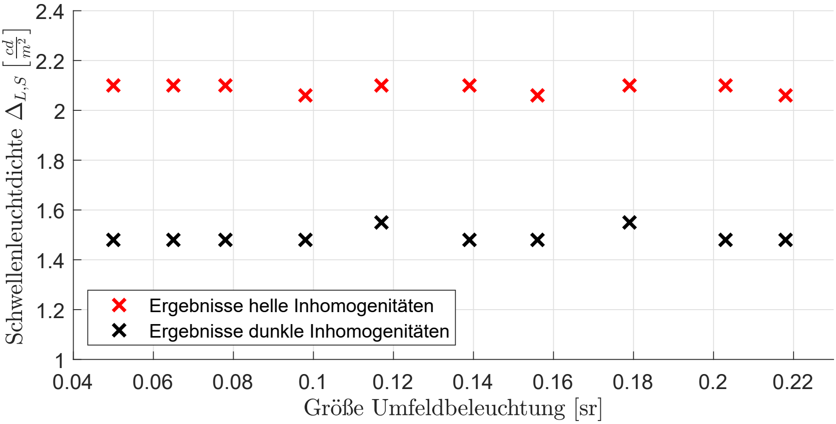



**Abbildung 5.5.:** Ergebnisse der Probandenstudie. Als Schwellenleuchtdichte zählt der dargebotene Reiz, ab welchem die Erkennungsrate über alle Einzelergebnisse der Probanden erstmals über 50 % liegt. Ein von der Umfeldbeleuchtung abhängiger Verlauf ist nicht erkennbar.

der Fragestellung und Wesen der Erkennbarkeits-Studie kann aus den Probandenantworten die Schwellenleuchtdichte nur dann als sicher bestimmt werden, wenn die Erkennbarkeitsrate erstmalig messbar über 50 % liegt. Für die jeweiligen Umfeldbeleuchtungen sind die Ergebnisse dieses Ansatzes in Abb. 5.5 gezeigt. Es ergibt sich für Inhomogenitäten der gleichen Art (HELL oder DUNKEL) ein konstanter Verlauf entlang zunehmender Umfeldbeleuchtungsfläche. Die Ausreißer sind aufgrund der umliegenden Daten tolerierbar.

Um den Median aller Einzelergebnisse zu vergleichen, ist in Abb. 5.6 der Boxplot der Daten gezeigt. Für jede Umfeldbeleuchtung wurden die Antworten auf die dargebotenen Reize so ausgewertet, dass eine Inhomogenität erst dann als erkannt gilt, wenn beide Durchläufe des gleichen Reizes durch den Probanden korrekt erkannt wurden. Die Mediane der Ergebnisse weisen keine erkennbare Abhängigkeit von der Umfeldbeleuchtung auf und liegen auf konstantem Niveau mit Schwankungen innerhalb der Quartile.

Die Mittelwerte der Erkennbarkeitsschwellen aller Probanden wurden ebenfalls aus den Einzelergebnissen gewonnen, bei denen nur 2 korrekte Antworten auf den gleichen Reiz als erkannt gelten. In Abb. 5.7 ist der Verlauf der Mittelwerte

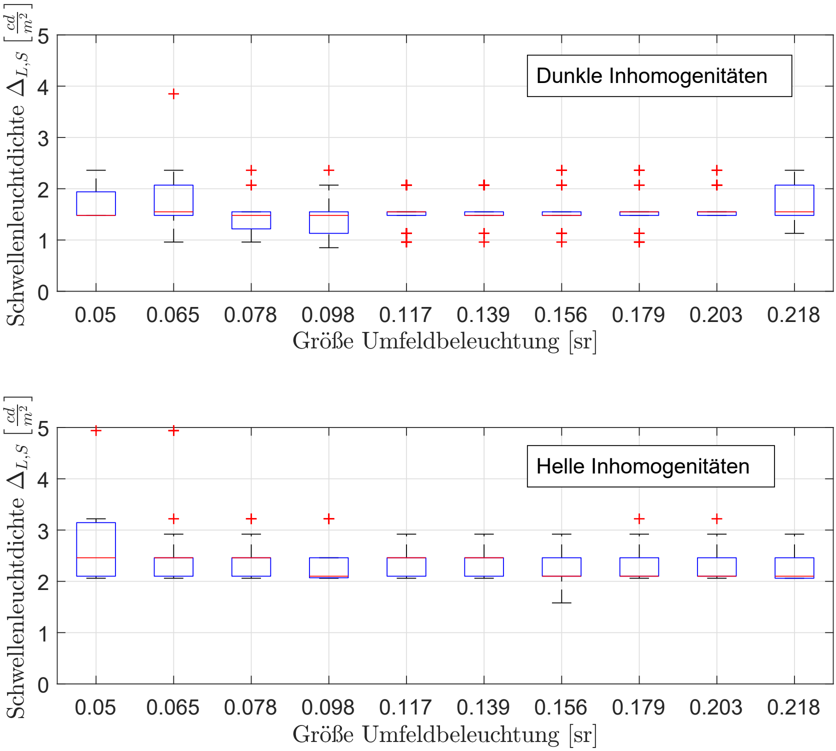



**Abbildung 5.6.:** Ergebnisse der Probandenstudie. Die ermittelten Schwellenleuchtdichten sind als Boxplot für die variierten Umfeldbeleuchtungen aufgetragen. Ein Reiz (oben dunkle Inhomogenitäten, unten helle) gilt dann als erkannt, wenn die Antworten des Probanden bei beiden Durchläufen pro Reiz korrekt sind. Der Verlauf der Mediane lässt keine Abhängigkeit der Umfeldbeleuchtung erkennen. Skalierung der Achsen für beide Teildiagramme identisch.

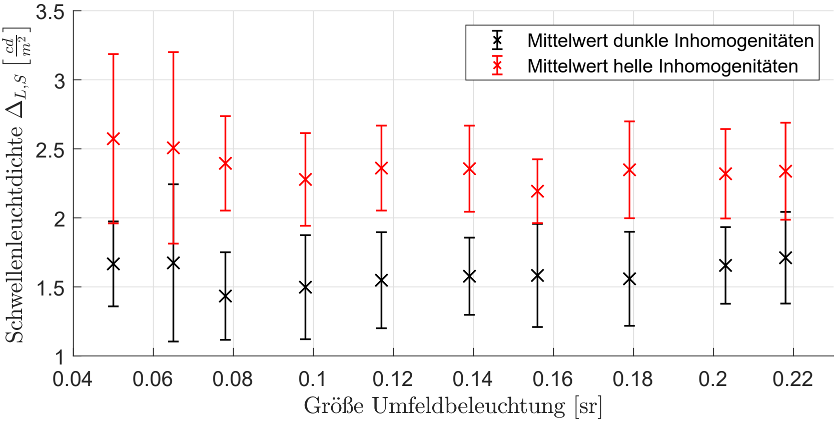



**Abbildung 5.7.:** Ergebnisse der Probandenstudie. Die Mittelwerte wurden aus den Einzelergebnissen aller Probanden gewonnen. Nur die korrekte Antwort auf wiederholte identische Reize wurde als erkannt gewertet. Die Fehlerintervalle zeigen die Standardabweichung bei der Mittelwertbestimmung.

in Abhängigkeit der Umfeldbeleuchtung aufgetragen. Aufgrund der Fehlerintervalle aus der Standardabweichung bei der Mittelwertsbestimmung kann kein Einfluss der Umfeldbeleuchtung erkannt werden.

Bei der Anwendung verschiedener statistischer Methoden zur Auswertung der Probandenstudie zeigt sich, dass dunkle Inhomogenitäten eine scheinbar niedrigere Schwellenleuchtdichte besitzen und daher bei kleineren Leuchtdichtedifferenzen von einem Hintergrund zu unterscheiden sind. Die Inhomogenitäten wurden über eine lokale Variation der Projektor-Graustufen erzeugt. Die Graustufendifferenz wurde hierbei für dunkle und helle Inhomogenitäten gleichermaßen erhöht.

Verglichen mit Abb. 5.2 ist für kleine Variationen der Graustufen ein lineares Verhalten des Projektors zu erwarten. Aus der Vermessung der Beamer-Graustufen lassen sich die Leuchtdichtedifferenzen der dargebotenen Inhomogenitäten ermitteln. Wie oben beschrieben wurde im Anschluss an die Probandenstudie zusätzlich jede Inhomogenität individuell mit einer Leuchtdichtekamera vermessen. Die Ergebnisse dieser beiden Verfahren sind in Abb. 5.8 gezeigt. Es ist

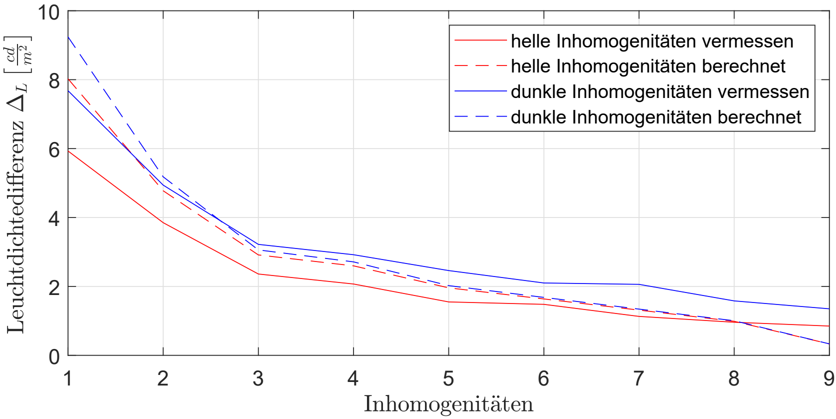



**Abbildung 5.8.:** Leuchtdichtedifferenzen der dargebotenen Inhomogenitäten. Aufgetragen sind die jeweils vermessenen (durchgehende Linien) und berechneten (gestrichelte Linien) Leuchtdichtedifferenzen für helle (rot) und dunkle (blau) Inhomogenitäten.

deutlich erkennbar, dass trotz gleicher Graustufendifferenz größere Leuchtdichtedifferenzen bei dunklen Inhomogenitäten resultieren.

Der Unterschied der aus Abb. 5.2 berechneten Leuchtdifferenzen (gestrichelte Linien in Abb. 5.8) zeigt, dass eine nachträgliche Vermessung notwendig war, da die systematisch ungleichmäßige Ausleuchtung des DMD-Chips und Linseneffekten des Projektors einen Einfluss auf die Darstellung der Inhomogenitäten hat.

Der abfallende Unterschied der berechneten Differenzen zwischen hell und dunkel verdeutlicht, dass im genutzten Bereich des Beamers keine Linearität zwischen Graustufe und Leuchtdichte vorliegt. Die ermittelten Schwellenleuchtdichten für dunkle Inhomogenitäten sind dennoch als korrekt anzunehmen, da diese aus der Vermessung der tatsächlichen Inhomogenitäten stammen und nicht aus der Vermessung des Beamers resultieren.

Die Ergebnisse der Probandenstudie zeigen, dass im mesopischen Bereich des Auges kein Einfluss der Umfeldbeleuchtung auf die Erkennbarkeit von Inhomogenitäten im Fokusbereich besteht. Sämtliche Variationen der Schwellenleuchtdichte liegen in den Fehlerintervallen aller Ergebnisse. Die Annahme, dass für die Ansätze aus Kapitel 4 die Adaptationsleuchtdichte lokal bestimmt werden

kann, wird aufgrund dieser Probandenstudie als plausibel gewertet. Somit eignen sich die vorgestellten Konzepte zur lokalen Bewertung von Inhomogenitäten in Scheinwerferlichtverteilungen.

## 5.2. GLOBALE HOMOGENITÄTSBEWERTUNG EINES LASERSCANNERS

Im Rahmen des Förderprojektes iLaS zur Entwicklung von Laserscannern im Scheinwerfer wurden mehrere Module aufgebaut. Exemplarisch werden in dieser Arbeit zwei Entwicklungsstände auf deren Homogenität untersucht. Dabei ist das erste Laserscannermodul ein früher Stand, bei welchem die einzelnen Kanäle der sechs Laserdioden in einer Expertenbewertung deutlich erkannt werden. Das so genannte zweite Laserscannermodul entspricht einer Weiterentwicklung, bei welcher durch eine andere Justage die Laserstrahlen näher zusammengebracht wurden.

Für die Analyse der Leuchtdichtedaten des Laserscanners müssen diese zunächst, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, vorbereitet werden. Die vorliegenden Datensätze der zwei Laserscannermodule wurden daher im ersten Schritt auf den Winkelbereich beschnitten, an welchem die maximale Leuchtdichte auf den $\frac{1}{e^2}$-ten Wert abgefallen ist.

Die resultierenden Leuchtdichteverteilungen sind in Abb. 5.9 und Abb. 5.10 dargestellt. Dabei zeigt schon die linerare Skalierung in Abb. 5.9, dass das erste Modul einen inhomogenen Verlauf aufweist. Die Überlappung der Strahlprofile der Laserkanäle im zweiten Modul sorgt dafür, dass eine Unterscheidung der Kanäle nicht mehr direkt erkennbar ist. Die Methode der Fourieranalylse soll daher zeigen, ob das Kriterium der Homogenität auch objektiv erfüllt wird.

Nach dem Eingrenzen der Daten auf den zu untersuchenden Bereich werden die Daten mit einem Tukey-Fenster gefaltet, um Unstetigkeiten an den Rändern zu eliminieren. So kann anschließend die zweidimensionale Fouriertransformation durchgeführt werden, aus welcher der relevante Schnitt extrahiert wird, um periodische Inhomogeniäten mit vertikaler Orientierung zu bewerten. In dieser

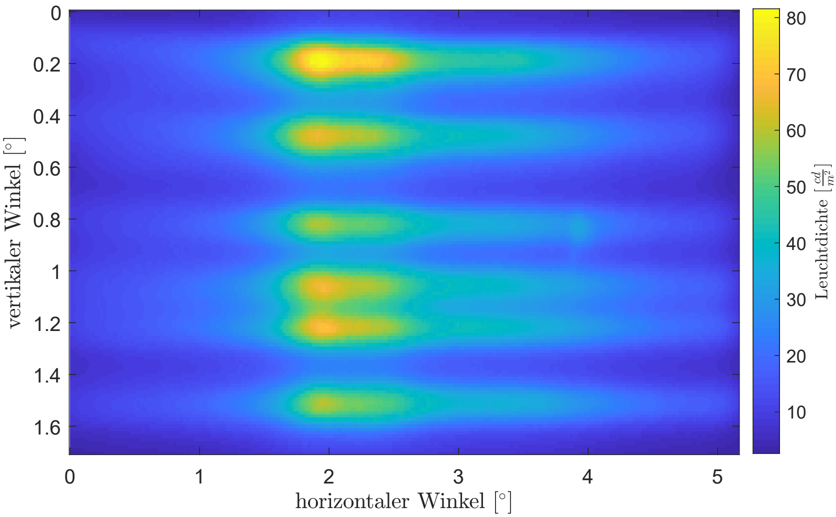



**Abbildung 5.9.:** Leuchtdichteverteilung in Falschfarbendarstellung des ersten Laserscannermoduls. Die einzelnen Kanäle der Laserdioden sind deutlich erkennbar.

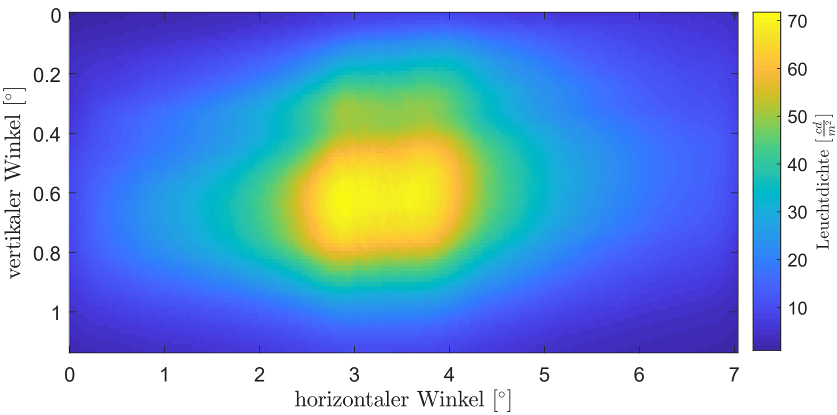



**Abbildung 5.10.:** Leuchtdichteverteilung in Falschfarbendarstellung des zweiten Laserscannermoduls. Die einzelnen Kanäle der Laserdioden sind nicht mehr voneinander zu unterscheiden.

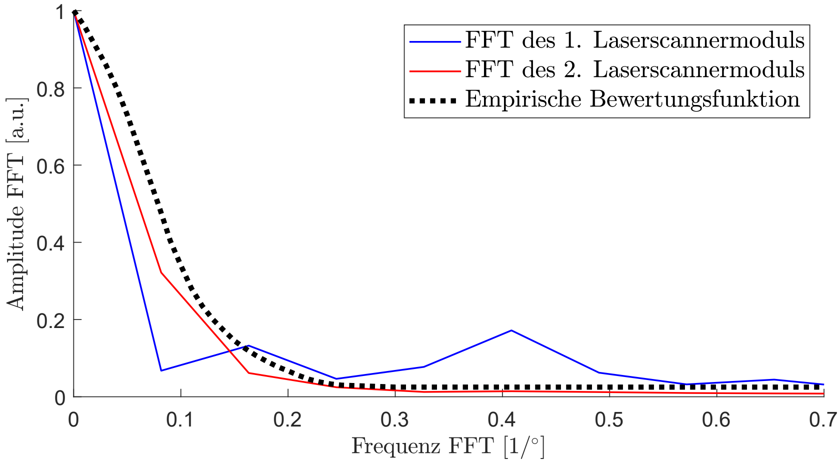



**Abbildung 5.11.:** Schnitte der 2D-Fouriertransformation der beiden Laserscannermodule im Vergleich mit der empirischen Bewertungsfunktion.

Richtung sind aufgrund des Aufbaus des Laserscannermoduls die Inhomogenitäten zu erwarten.

In Abb. 5.11 sind die resultierenden Daten der Fouriertransformation der beiden Laserscanner gezeigt. Die Kurve des ersten Moduls weist einen Verlauf mit ausgeprägten Peaks auf. Der deutlichste Ausschlag, welcher signifikant über der empirischen Bewertungsfunktion liegt, ist bei $\approx 0{,}41\ \frac{1}{\circ}$. Im Realraum entspricht dies einer Periodizität von $\approx 0{,}39°$.

Diese Periodizität ist näherungsweise in Abb. 5.9 wiederzufinden, wenn die Winkel zwischen den Leuchtdichtemaxima abgemessen werden. Dass der Wert der Periodizität nicht exakt mit den Abständen der Laserkanäle übereinstimmt, ist auf die ungleichmäßige vertikale Verteilung der 6 Laser zurückzuführen. Damit spielen mehrere Frequenzen in der Fouriertransformation eine Rolle und bewirken durch deren Addition im Fourierraum einen breiteren Peak anstatt einem einzelnen Ausschlag in Abb. 5.11. Zudem ist die Auflösung endlich, weshalb die diskrete Abtastung nur Amplituden für diskrete Freuqenzen erzeugt.

Der Verlauf des Schnitts der Fourieranalyse des zweiten Laserscanners unterscheidet sich deutlich von dem des ersten Moduls. Es sind keine Peaks im Ver-

lauf der Frequenzen erkennbar und die gesamte Kurve liegt zudem unterhalb der empirischen Bewertungsfunktion. Damit kann die Leuchtdichteverteilung des zweiten Scannermoduls aus Abb. 5.10 als homogen bezüglich periodischer Inhomogenitäten gewertet werden. Das bedeutet nicht, dass keine Periodizität innerhalb der Lichtverteilung vorhanden ist. Diese sind aber ausreichend schwach ausgeprägt, sodass sie nicht als störend gelten.

Die Methode der Fourieranalyse von Leuchtdichteverteilungen zur Bewertung der Homogenität ist für das System des Laserscanners anwendbar. Der Ansatz ist jedoch auch fehleranfällig. Die Analyse im Frequenzraum zeigt zwar beim ersten Scannermodul einen Ausschlag oberhalb der Bewertungsfunktion, allerdings ist dieser nicht eindeutig einer Periodizität im Realraum zuzuordnen. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass inhomogene Lichtverteilungen, welche mehrere, ungleichmäßige oder gar keine Periodizitäten aufweisen, ein falsches oder aussageschwaches Ergebnis liefern.

Für die globale Bewertung einer Lichtverteilung ist diese Methode daher geeignet, sollte aber in Kombination mit lokalen Analysen genutzt werden. Für die beiden vorgestellten Leuchtdichteverteilungen der zwei Laserscannermodule sind daher die Ansätze der Gradienten- und Kontrastanalyse in den folgenden Kapiteln angewandt worden.

## 5.3. LOKALE HOMOGENITÄTSBEWERTUNG EINES LASERSCANNERS

### GRADIENTENANALYSE EINES LASERSCANNERS

Für die Anwendung der Gradientenanalyse werden zunächst die Aufnahmen mit der Leuchtdichtekamera auf den relevanten zu bewertenden Bereich beschnitten. Im Gegensatz zur Fourieranalyse kann der Ausschnitt größer sein, daher wurde sich für die folgenden Daten auf den Winkelbereich beschränkt, bei dem die maximale Leuchtdichte auf $\approx 1\,\%$ abgefallen ist. Hierdurch können auch lokale Inhomogenitäten im auslaufenden Teil der Lichtverteilung lokalisiert werden.

Wie in Abschnitt 4.3 beschrieben wird für jeden Datenpunkt der Leuchtdichteaufnahme der Gradient gebildet. Als Radius hierfür wird ein Pixel gewählt. Somit resultiert eine Matrix aus Gradienten, welche die maximalen lokalen Leuchtdichteunterschiede beinhaltet. Dieses Vorgehen der lokalen Betrachtung ist mit den Ergebnissen der Studie zum Adaptationsverhalten des menschlichen Auges aus Abschnitt 5.1 plausibel.

Zur Bewertung, ob der lokale Leuchtdichtegradient erkennbar ist und damit als Inhomogenität wahrzunehmen ist, wird der Gradient mit der Weber-Fechner-Bewertungsfunktion aus Abschnitt 2.2.2 verglichen. Als x-Achsen-Abschnitt, der Umgebungs- bzw. Adaptationsleuchtdichte, wird in der Gradientenanalyse die Leuchtdichte des zu bewertenden Pixels gewählt.

Das Ergebnis dieser Methode ist eine binäre Beurteilung der Lichtverteilung in homogen und inhomogen, je nachdem ob der Gradient unterhalb oder oberhalb der Weber-Fechner-Kurve liegt. Diese Beurteilung wird in den folgenden Abbildungen durch Einfärben der jeweiligen Pixel in grün (homogen) und rot (inhomogen) visualisiert.

Abbildung 5.12 zeigt das Ergebnis der Gradientenanalyse für das erste Laserscannermodul als Gesamtübersicht. In der dreidimensionalen Ansicht lassen sich die Regionen der Inhomogenitäten mit dem Verlauf der Leuchtdichte im Datensatz verknüpfen. Die sechs Laserkanäle sind deutlich voneinander zu unterscheiden. Die Flanken der abfallenden Leuchtdichte zwischen den Lasern werden als inhomogen bewertet. Ein Nachteil an dieser Darstellung sind verdeckte Daten mit geringeren Leuchtdichten. Daher zeigt Abb. 5.13 die Fahrerperspektive und damit das Ergebnis des gesamten Datenbereichs. Ein direkter Bezug zur lokalen Höhe der Leuchtdichte ist hier allerdings nicht mehr gegeben.

Dennoch lässt sich der ausgeleuchtete Bereich des Laserscanners erkennen, da am Rand der beleuchteten Fläche ein Abfallen der Leuchtdichte systembedingt durch die Form des Konverters vorliegt und somit Gradienten erkennbar sind. Innerhalb dieser Eingrenzung treten mehrere horizontale, teilweise zusammenhängende Bereiche mit homogenem Bewertungsergebnis auf.

Die Ursache dieser Resultate lässt sich durch einen Blick auf die Daten im rechten Winkel zur Scan-Achse aus Abb. 5.14 erklären. Da ein Pixel als homogen gilt, welcher aufgrund eines geringen Leuchtdichtegradienten bezüglich seiner

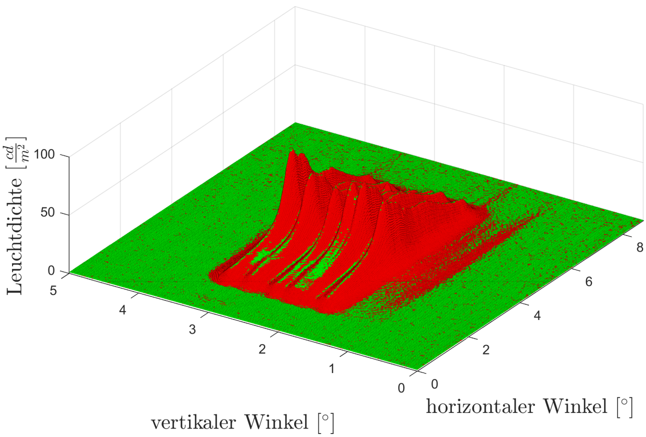



**Abbildung 5.12.:** 3-dimensionale Darstellung der Gradientenanalyse des ersten Laserscannermoduls. Die z-Achse entspricht der Leuchtdichte. Die Einfärbung der Pixel entspricht dem Ergebnis der Homogenitätsbewertung mit der Weber-Fechner-Kurve. Rote Bereiche werden als nicht homogen und störend wahrgenommen. Grüne Bereiche entsprechen nicht-wahrnehmbaren Leuchtdichtedifferenzen und werden als homogen klassifiziert.

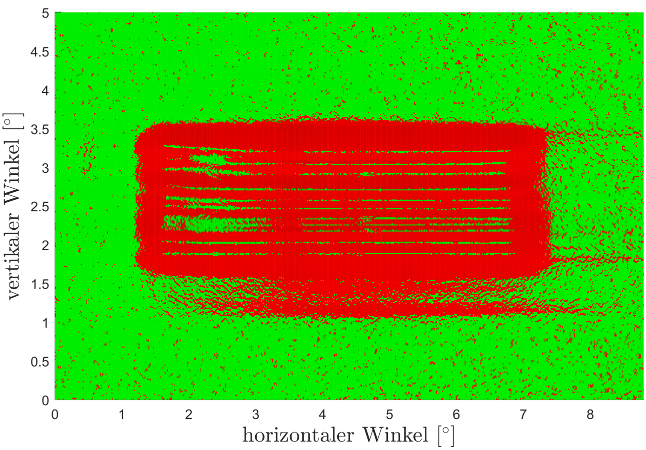



**Abbildung 5.13.:** Gradientenanalyse des ersten Laserscannermoduls aus Fahrerperspektive. Die Einfärbung der Pixel entspricht dem Ergebnis der Homogenitätsbewertung mit der Weber-Fechner-Kurve.

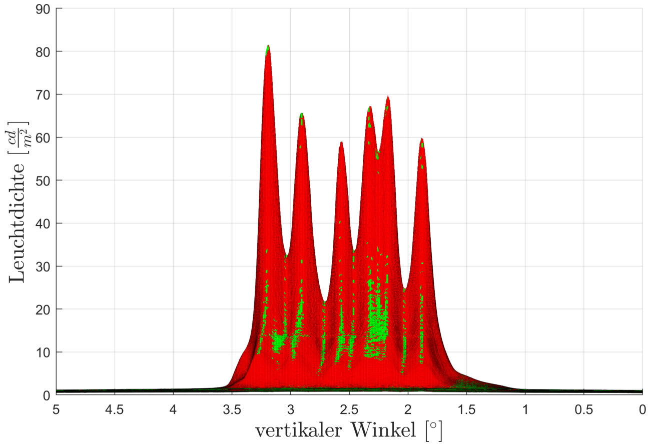



**Abbildung 5.14.:** 3-dimensionale Darstellung der Gradientenanalyse des ersten Laserscannermoduls im Seitenprofil. Die z-Achse entspricht der Leuchtdichte. Die Einfärbung der Pixel entspricht dem Ergebnis der Homogenitätsbewertung mit der Weber-Fechner-Kurve.

Umgebung unterhalb der Weber-Fechner-Bewertungsfunktion liegt, sind die homogenen Regionen innerhalb des Laserscannerbereichs an den Minima und Maxima zwischen den einzelnen Laserkanälen vorzufinden. Hier ist insbesondere der Verlauf der Leuchtdichte entlang der vertikalen Achse lokal flach, sodass auch der Gradient minimal wird. Um den Ausleuchtungsbereich des Laserscanners herum werden die Daten vorrangig homogen bewertet. Vereinzelte inhomogene Pixel oder Cluster sind auf Rauschen der Messdaten zurückzuführen, dürfen aber für die Einschätzung der Homogenität des Laserscannermoduls keinen Einfluss haben.

Dass die Leuchtdichteverteilung des ersten Laserscannermoduls nicht homogen ist, wird vor allem im Seitenprofil in Abb. 5.14 deutlich. Der Blick auf das Resultat der Gradientenanalyse in Abb. 5.12 zeigt, dass der Ansatz der Bewertung von Lichtverteilungen mit der Gradientenmethode plausibel ist. Abfallende Flanken werden als inhomogen klassifiziert.

In Abb. 5.15 ist die dreidimensionale Darstellung des Resultats der Gradientenanalyse für das zweite Laserscannermodul gezeigt. Der rechteckige Ausleuchtungsbereich des Moduls ist erkennbar, da innerhalb dessen ein Leuchtdich-

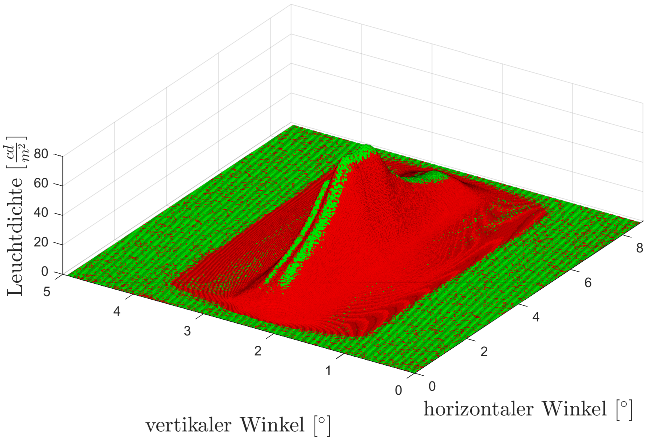



**Abbildung 5.15.:** 3-dimensionale Darstellung der Gradientenanalyse des zweiten Laserscannermoduls. Die z-Achse entspricht der Leuchtdichte. Die Einfärbung der Pixel entspricht dem Ergebnis der Homogenitätsbewertung mit der Weber-Fechner-Kurve.

teabfall auftritt, welcher jeweils lokal als erkennbarer Gradient bewertet wird. Die Region hoher Leuchtdichte, die den gewollten und nutzbaren Anteil der Lichtverteilung ausmacht, hat mehr zusammenhängende homogene Bereiche im Vergleich zum ersten Modul aus Abb. 5.12.

Dennoch gibt es bei ca. 2,4° eine Unterbrechung der homogenen Ausleuchtung. Noch deutlicher ist dies in Abb. 5.16 zu erkennen. Im Zentrum der Lichtverteilung trennt eine inhomogene Region das homogene Plateau. Die Ursache hierfür wird aus Abb. 5.17 ersichtlich. Die Intensitäten der Laserkanäle sind nicht konstant, sondern die oberen Kanäle weisen eine geringere Intensität auf, wodurch ein Gradient zwischen den oberen und restlichen Kanälen entsteht, welche folglich von der Gradientenmethode als inhomogen klassifiziert wird.

Die Methode der Gradientenalanyse eignet sich somit nicht nur für deutliche Inhomogenitäten, welche schon anhand der Leuchtdichteverteilung identifiziert werden können, sondern auch für Übergänge zwischen Segmenten von Lichtverteilungen.

In Abb. 5.18 sind Kameraaufnahmen der beiden Laserscannermodule gezeigt. Trotz der Defokussierung der Aufnahme lässt sich für das zweite Laserscanner-

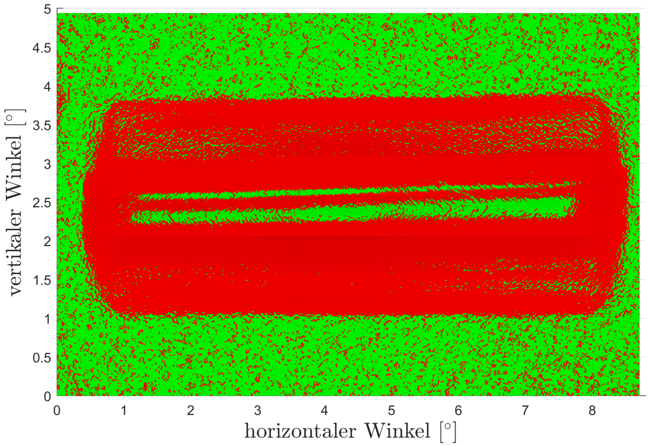



**Abbildung 5.16.:** Gradientenanalyse des zweiten Laserscannermoduls aus Fahrerperspektive. Die Einfärbung der Pixel entspricht dem Ergebnis der Homogenitätsbewertung mit der Weber-Fechner-Kurve.

modul eine unterschiedliche Helligkeit im oberen Bereich der Laserscannerausleuchtung erkennen. Diese ist mit dem Auge ebenso wahrnehmbar, welches in der Laborsituation besser als die verwendete Kamera auf die Leuchtdichte und Entfernung adaptiert und fokussiert.

Im Vergleich der Realbilder beider Scannermodule wird noch einmal die unterschiedliche Ausprägung der Homogenität deutlich. Die einzelnen Kanäle des ersten Moduls sind deutlich voneinander zu unterscheiden. Zudem ist ein Unterschied der Farbtemperatur erkennbar. Bei der Wahl des Konvertes im zweiten Modul wurde zur Erhöhung der Homogenität unter anderem ein dickerer Konverter gewählt. Somit ist der Strahlweg durch den Konverter weiter, was zu einer breiteren Emission nach dem Konverter führt und durch die zusätzliche Weglänge zudem mehr Konvertierungsprozesse des blauen Laserlichts ermöglicht. Dadurch ist der Anteil des konvertiertem Lichts höherer Wellenlängen größer und der Weißton der Lichtverteilung wärmer.

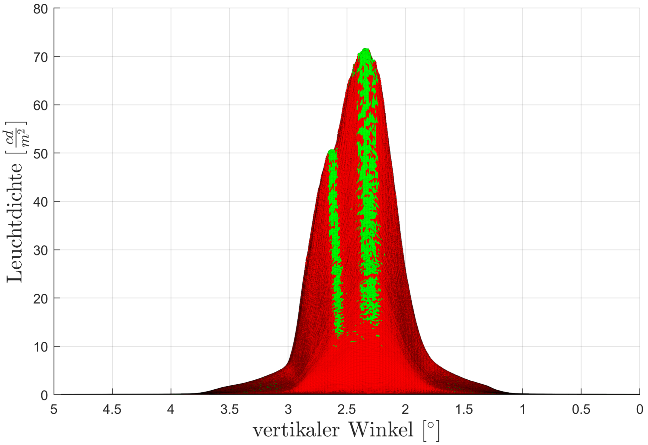



**Abbildung 5.17.:** 3-dimensionale Darstellung der Gradientenanalyse des zweiten Laserscannermoduls im Seitenprofil. Die z-Achse entspricht der Leuchtdichte. Die Einfärbung der Pixel entspricht dem Ergebnis der Homogenitätsbewertung mit der Weber-Fechner-Kurve.

## KONTRASTANALYSE EINES LASERSCANNERSYSTEMS

Analog zur Gradientenmethode der Leuchtdichteaufnahmen soll in diesem Kapitel die Homogenität mit Hilfe der in Abschnitt 4.3 vorgestellten Kontrastanalyse bestimmt werden. In den Abbildungen 5.19 bis 5.24 sind die gleichen Darstellungen der Leuchtdichtedaten wie in Abschnitt 5.3 gezeigt.

Der Unterschied besteht in der Bewertungsmethodik, mit welcher die Bereiche der Lichtverteilung als homogen oder inhomogen bewertet werden. Hierbei wird als Leuchtdichteunterschied nicht der maximale Gradient angenommen, sondern die Differenz des zu bewertenden Pixels zur lokalen Adaptationsleuchtdichte, welche sich aus der direkten Umgebung ergibt.

Die Ergebnisse lassen gleiche Interpretationen der Homogenitätsanalyse von Laserscannerlichtverteilungen zu. Auch beim Ansatz der Kontrastanalyse sind im ersten Scannermodul die separaten Laserkanäle zu unterscheiden (Abb. 5.19), weil entlang der Scanrichtung jeweils zusammenhängende homogene Regionen angezeigt werden (Abb. 5.20). Die deutlich abfallenden Flanken der Leucht-

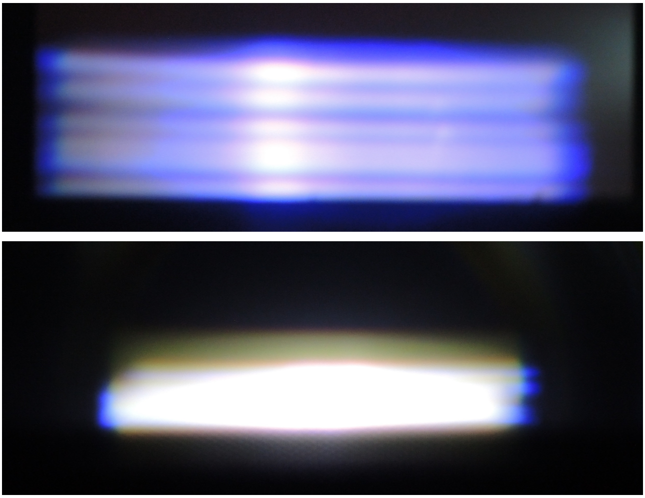


**Abbildung 5.18.:** Fotographien der Laserscanner-Lichtverteilungen des ersten (oben) und zweiten (unten) Laserscannermoduls. Neben der unterschiedlichen Farbtemperatur ist vor allem die wahrnehmbare Differenzierung der einzelnen Laserkanäle deutlich unterschiedlich.

dichte zwischen den Laserkanälen werden wie bei der Gradienten-Methode als inhomogen bewertet (Abb. 5.21). Zudem liegt außerhalb des erkennbaren Scannerbereichs, welcher vom Konverter begrenzt wird, keine vorhandene Inhomogenität im unbeleuchteten Umfeld. Lediglich ein Rauschen der Messdaten ist erkennbar und lässt vereinzelte Pixel als inhomogen erscheinen.

Die gleiche Symptomatik zeigt sich beim zweiten Scannermodul. Der letztlich für die Lichtfunktionen relevante Winkelbereich hoher Intensitäten wird als homogen bewertet (Abb. 5.23). Der Leuchtdichteunterschied der oberen beiden Laserkanäle resultiert auch bei der Kontrastanalyse in einem inhomogenen Streifen zwischen diesen Regionen (Abb. 5.24).

Ein anderes Ergebnis im Vergleich zur Gradientenanlyse ist in Abb. 5.23 zu erkennen. Hier wird der Bereich innerhalb des Konverters, aber nach Abfallen der Leuchtdichte des vom Laser ausgeleuchteten Feldes, als eine Mischung aus homogen und inhomogen bewertet. Es lassen sich weder zusammenhängende rote noch ausgedehnte grüne Regionen definieren. Im Vergleich dazu wird in Abbildung 5.16 der gesamte Bereich zwischen abfallender Leuchtdichte bis zum Konverterrand als inhomogen bewertet.

Tendenziell fallen die Ergebnisse der Kontrastanalyse positiver aus, da mehr Bereiche als homogen bewertet werden. Daher stellt sich die Frage, welche der beiden Methoden der typisch subjektiven Wahrnehmung von Inhomogenitäten statistisch näher kommt und ob die Gradientenanalyse zu kritisch ist oder die Kontrastmethode zu positiv ausfällt. Dies bedarf einer weiterführenden Untersuchung, bei der die Methoden auf eine Vielzahl verschiedener Leuchtdichteverteilungen mit individuellen Merkmalen angewendet werden müssen und einer parallelen Studie, bei der die subjektiven Bewertungen dieser Lichtverteilungen durch Probanden statistisch zu ermitteln sind.

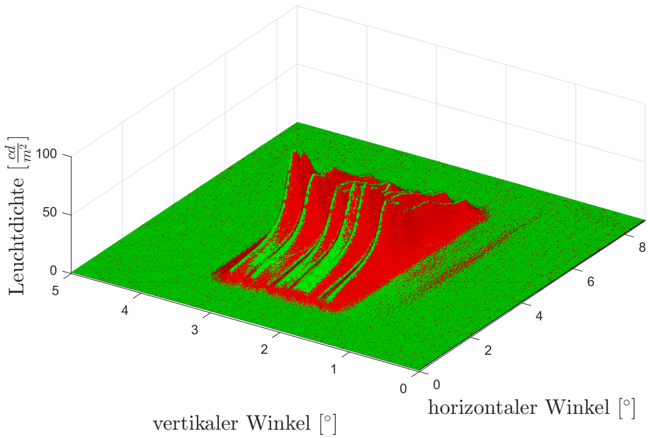



**Abbildung 5.19.:** 3-dimensionale Darstellung der Kontrastanalyse des ersten Laserscannermoduls. Die z-Achse entspricht der Leuchtdichte. Die Einfärbung der Pixel entspricht dem Ergebnis der Homogenitätsbewertung mit der Weber-Fechner-Kurve.

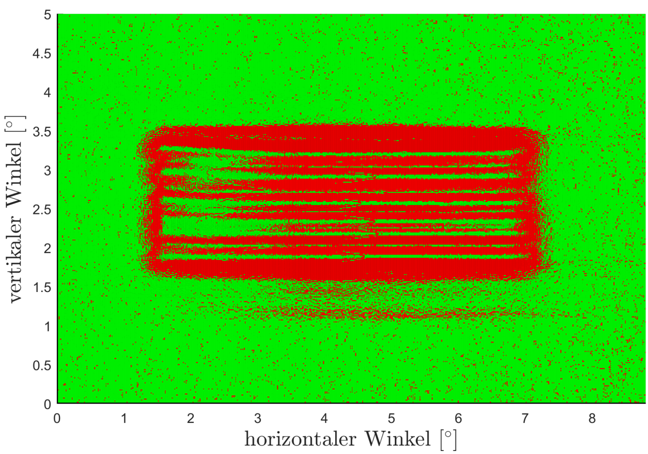



**Abbildung 5.20.:** Kontrastanalyse des ersten Laserscannermoduls aus Fahrerperspektive. Die Einfärbung der Pixel entspricht dem Ergebnis der Homogenitätsbewertung mit der Weber-Fechner-Kurve.

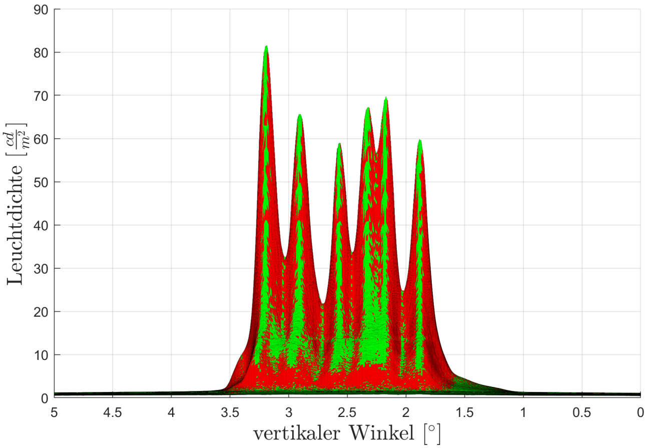



**Abbildung 5.21.:** 3-dimensionale Darstellung der Kontrastanalyse des ersten Laserscannermoduls im Seitenprofil. Die z-Achse entspricht der Leuchtdichte. Die Einfärbung der Pixel entspricht dem Ergebnis der Homogenitätsbewertung mit der Weber-Fechner-Kurve.

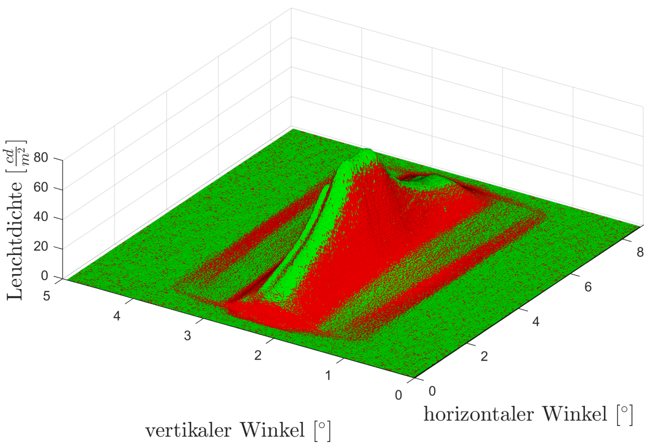



**Abbildung 5.22.:** 3-dimensionale Darstellung der Kontrastanalyse des zweiten Laserscannermoduls. Die z-Achse entspricht der Leuchtdichte. Die Einfärbung der Pixel entspricht dem Ergebnis der Homogenitätsbewertung mit der Weber-Fechner-Kurve.

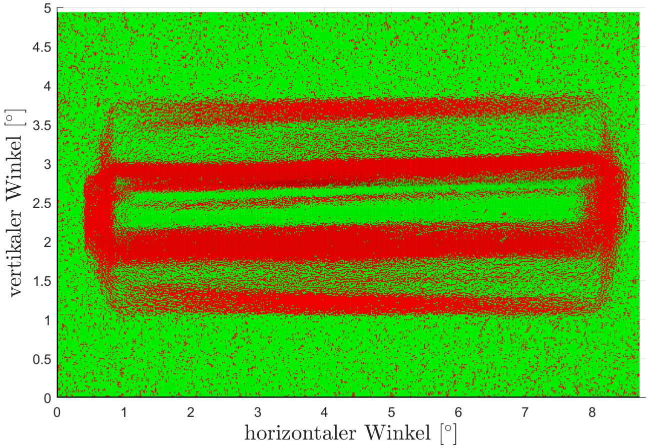



**Abbildung 5.23.:** Kontrastanalyse des zweiten Laserscannermoduls aus Fahrerperspektive. Die Einfärbung der Pixel entspricht dem Ergebnis der Homogenitätsbewertung mit der Weber-Fechner-Kurve.

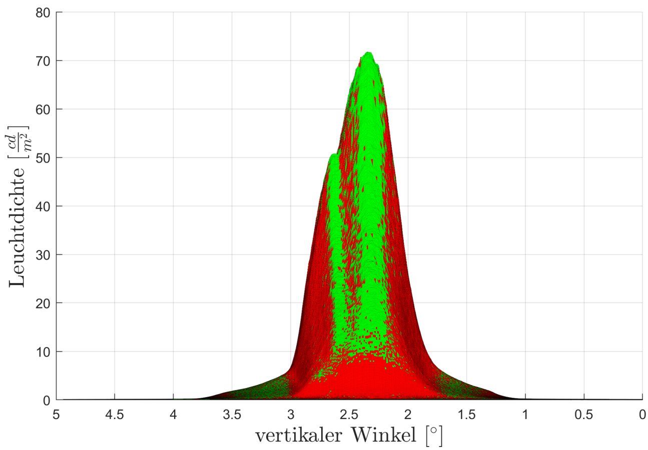



**Abbildung 5.24.:** 3-dimensionale Darstellung der Kontrastanalyse des zweiten Laserscannermoduls im Seitenprofil. Die z-Achse entspricht der Leuchtdichte. Die Einfärbung der Pixel entspricht dem Ergebnis der Homogenitätsbewertung mit der Weber-Fechner-Kurve.

## 5.4. ÜBERTRAGUNG AUF ANDERE SCHEINWERFERTECHNOLOGIEN

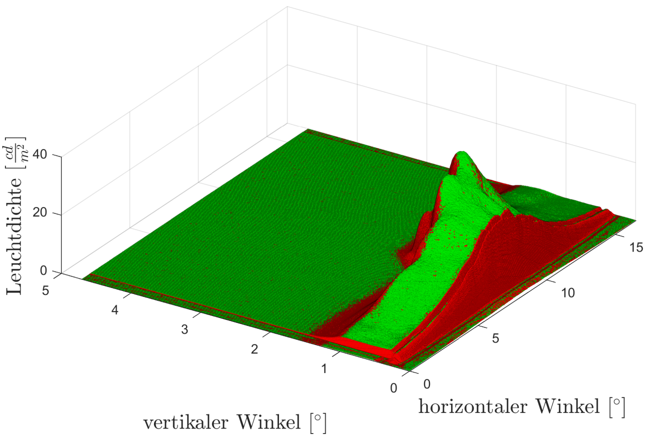
Die Anwendung der drei vorgestellten Methodiken auf das prototypische Laserscannersystem zeigt, dass es möglich ist sowohl eine Bewertung der gesamten Lichtverteilung als auch lokaler Leuchtdichteverläufe durchzuführen. Im Folgenden sollen daher die entwickelten Ansätze zur Homogenitätsbewertung auch auf Standardlichtverteilungen aus Serienscheinwerfern angewendet werden.

Hierzu wurden Leuchtdichteverteilungen eines Bi-Xenon-Moduls des Audi A6 (Modelljahr 2014) der Funktionen Abblendlicht und Fernlicht aufgenommen. Dieses entspricht einem Standard-Xenon-Modul, welches in einer Vielzahl von Scheinwerfern eingesetzt wird. Dabei wird die Optik des Moduls so ausgelegt, dass die Anforderungen für eine Fernlichtverteilung erfüllt werden.

Um ein Abblendlicht zu realisieren wird eine Blende in den Strahlengang gedreht, welche Teile des Fernlichts blockiert und so die typische Hell-Dunkel-Grenze eines Abblendlichts erzeugt. Die Leuchtdichteaufnahmen wurden von einem Fahrzeug mit korrekt eingestelltem Abblendlicht gemacht. Dabei ist das Gesamtlichtbild aufgenommen worden, dies entspricht der Überlagerung vom rechten und linken Scheinwerfer.

In Abbildungen 5.25 bis 5.27 sind die Ergebnisse der Gradienten- und Kontrastanalyse für das Xenon-Abblendlicht dargestellt. Am unteren Ende der Lichtverteilung bei ca. 0,3° ist eine Kante zu erkennen, welche nicht aus dem Lichtmodul stammt, sondern ein Artefakt der Datenaufnahmen ist. Der Winkelbereich des Abblendlichts ist so groß, dass nicht nur die vertikale Leinwand vor dem Scheinwerfer beleuchtet und vermessen wurde, sondern auch der Übergang zum Boden des Lichtkanals, in welchem die Aufnahmen entstanden. Der Messabstand wurde daher im Vergleich zu den Aufnahmen der Laserscannermodule auf 20 m vergrößert.

Im Vergleich beider Methoden zeigt sich insbesondere an dieser schmalen Leuchtdichten-Kante, dass der Ansatz der Kontrastauswertung in der Umgebung von Maxima eher zu einer homogenen Bewertung führt als die Gradientenmethode. Der Grund hierfür kann die in Abschnitt 4.3 beschriebene Selektion der hellsten Umgebungspixel zur Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte



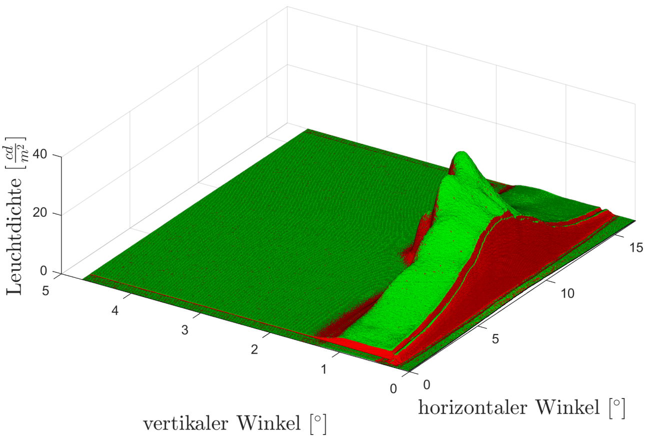




**Abbildung 5.25.:** Lokale Homogenitätsbewertung eines Xenon-Abblendlichts. Oben: Ergebnis der Gradientenmethode. Unten: Ergebnis der Kontrastanalyse

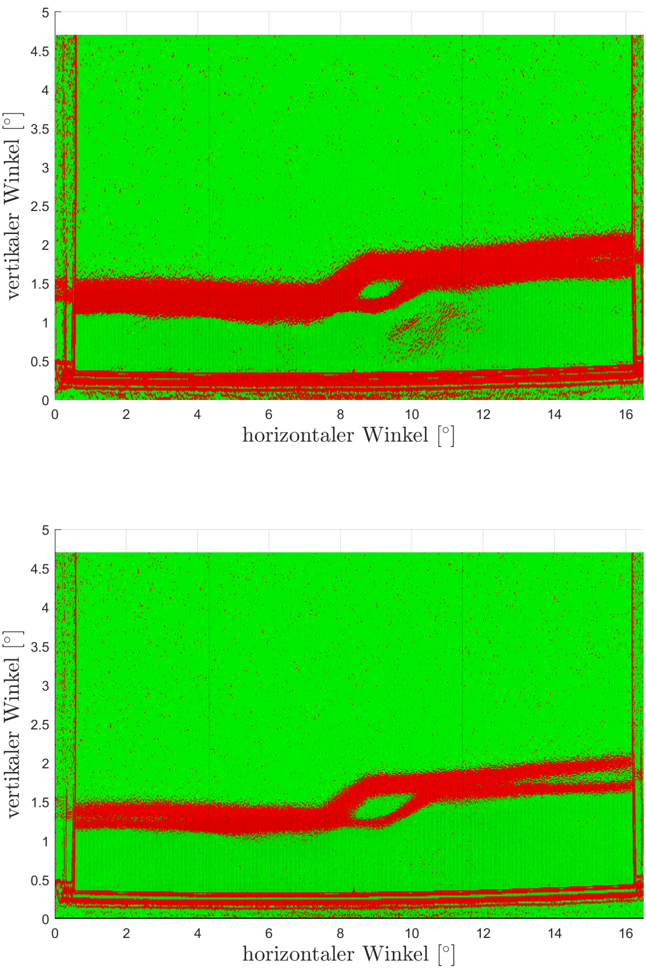
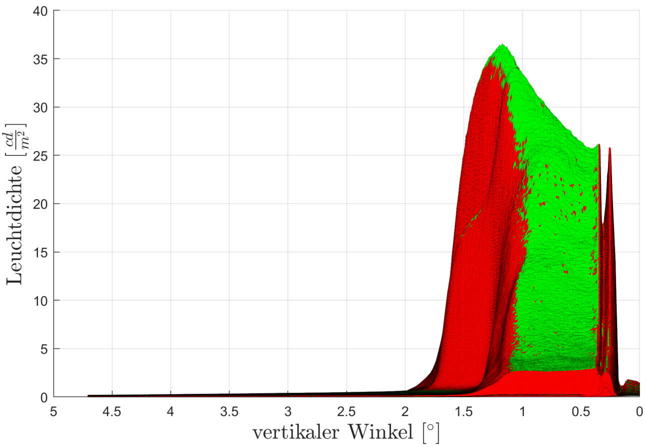



**Abbildung 5.26.:** Lokale Homogenitätsbewertung eines Xenon-Abblendlichts aus der Fahrerperspektive. Oben: Ergebnis der Gradientenmethode. Unten: Ergebnis der Kontrastanalyse



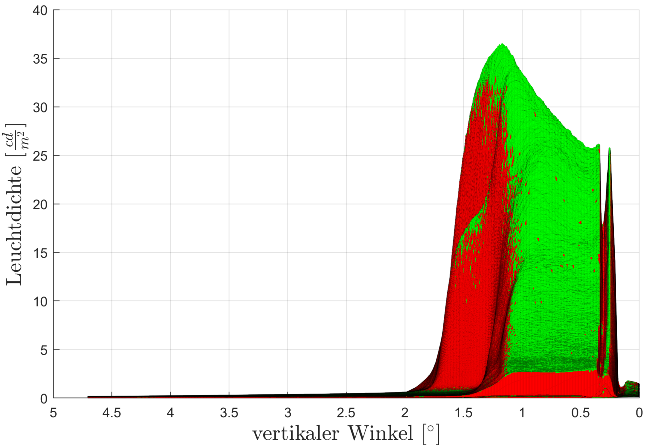




**Abbildung 5.27.:** Lokale Homogenitätsbewertung eines Xenon-Abblendlichts im Seitenprofil. Oben: Ergebnis der Gradientenmethode. Unten: Ergebnis der Kontrastanalyse

sein. Dadurch werden an einer scharfen Kante die Datenpunkte mit deutlich geringerer Leuchtdichte nicht zur Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte einbezogen, welche aber gerade der Grund für eine erkennbare Inhomogenität an einem starken Kontrast sind. Der Ansatz der Gradientenmethode ist davon unabhängig und für kontrastreiche Lichtverteilungen scheinbar besser geeignet.

Eine für Serienscheinwerfer typische Region mit hohem Kontrast ist die Hell-Dunkel-Grenze eines Abblendlichts. Abbildung 5.27 zeigt die Seitenansicht der Lichtverteilung. Hier wird deutlich, dass der Abfall der Leuchtdichte an der Hell-Dunkel-Grenze einen geringeren Gradienten als die Artefakt-Kante am Boden der Lichtverteilung besitzt. Da die Hell-Dunkel-Grenze als ausgedehnte Inhomogenität auch von der Kontrastanalyse erkannt wird, ist die Anwendbarkeit für reale Lichtverteilungen durchaus gegeben.

In Abb. 5.28 und 5.29 sind die Auswertungen der beiden Methoden für ein Xenon-Fernlicht gezeigt. Erneut lässt sich die Inhomogenität der Leuchtdichteaufnahme am Rand der Leinwand erkennen, auf welche die Lichtverteilung für die Aufnahme projiziert wurde. Im Zentrum der Lichtverteilung wird der Doppel-Peak der beiden Fernlichtlichtmodule aus rechtem und linkem Scheinwerfer deutlich, um welchen durch den Abfall der Leuchtdichte inhomogene Zonen entstehen.

Aus dem Zusammenhang der abfallenden Leuchtdichte, welche typisch für eine Xenon-Fernlichtverteilung ist, und der inhomogen bewerteten Regionen in Abb. 5.28 zeigt sich, dass die Gradientenmethode sensitiv auf jeglichen Leuchtdichteverlauf ist. Durch die lokale Anwendung der Analyse an jedem Punkt der Daten lassen sich damit ausgedehnte inhomogene Leuchtdichteverläufe identifizieren. Im Vergleich dazu wird vor allem in Abb. 5.28 deutlich, dass die Kontrastanalyse ausgeprägte lokale Inhomogenitäten innerhalb der Fernlichtverteilung aufzeigt. Gleichmäßige Verläufe der Leuchtdichte über einen ausgestreckten Bereich werden hier als homogen bewertet.

Da sowohl das Abblendlicht als auch das Fernlicht eines Xenon-Scheinwerfermoduls aus einer gemeinsamen Lichtquelle stammen, lässt sich keine Überlagerung und damit Aufsetzpunkt des Fernlichts oberhalb des Abblendlichtbereichs in Abbildung 5.28 erkennen. Auch die Auswertung der Homogenität mit beiden Methoden zeigt keine Inhomogenität am Übergang zwischen diesen beiden Lichtfunktionen.

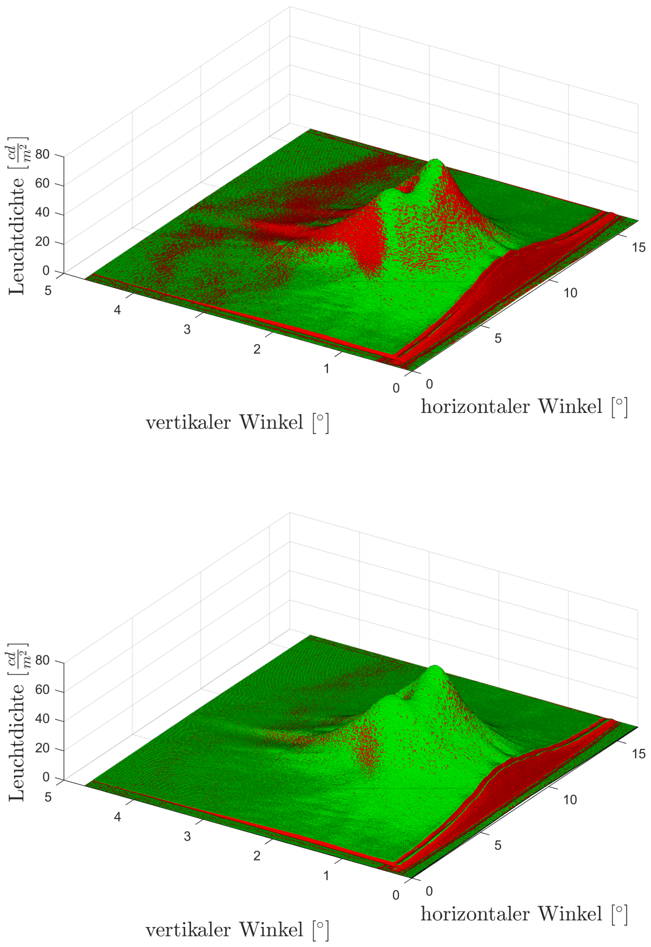
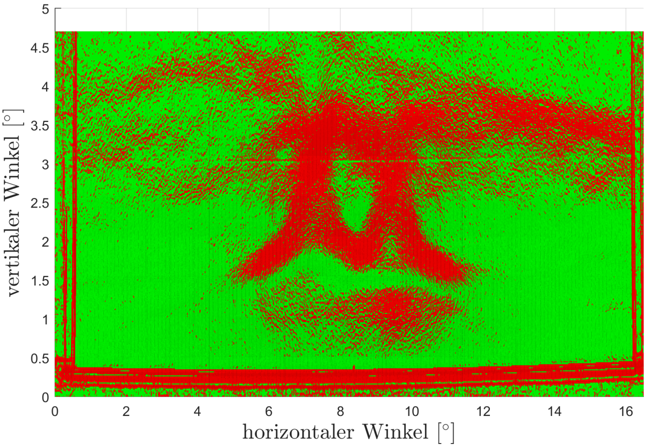



**Abbildung 5.28.:** Lokale Homogenitätsbewertung eines Xenon-Fernlichts. Oben: Ergebnis der Gradientenmethode. Unten: Ergebnis der Kontrastanalyse



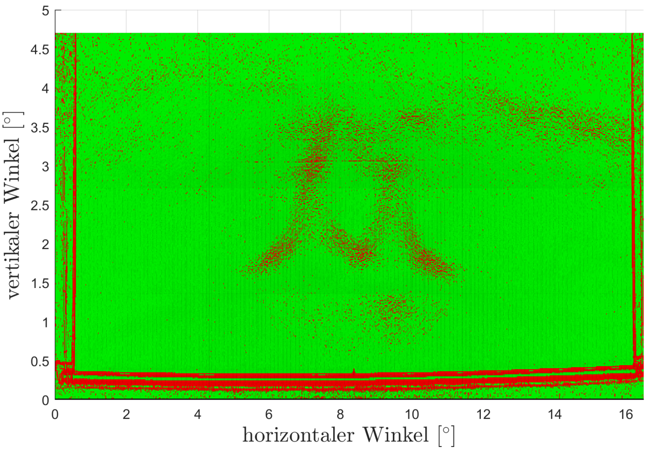




**Abbildung 5.29.:** Lokale Homogenitätsbewertung eines Xenon-Fernlichts aus der Fahrerperspektive. Oben: Ergebnis der Gradientenmethode. Unten: Ergebnis der Kontrastanalyse

Moderne LED-Scheinwerfer besitzen oft keine mechanische Optik in Form einer Walze, sondern haben separate Lichtquellen für das Abblend- und Fernlicht. Dabei werden je nach Funktionsanforderung durch das Fahrzeug nur die entsprechenden LEDs aktiviert. Die Fernlichtverteilung ist daher eine Superposition aus mehreren LED-Lichtbildern. Insbesondere die Überlagerung zwischen Abblendlicht und Fernlicht birgt hier das Risiko Inhomogenitäten zu erzeugen. Die Bewertung von typischen LED-Scheinwerfern ist in Abb. 5.30 für die Gradientenmethode und in Abb. 5.31 für die Kontrastanalyse dargestellt. Die Aufnahmen hierzu stammen von einem LED-Scheinwerfer des Fahrzeugs Audi A6 (Modelljahr 2014).

Beide Ansätze der Homogenitätsbewertung weisen deutlich auf die Inhomogenität am Übergang der Lichtfunktionen hin. Das LED-Fernlicht ist optisch so ausgelegt, dass es zusätzlich Winkelbereiche oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze des Abblendlichts ideal ausleuchtet und seinerseits eine Hell-Dunkel-Grenze besitzt, welche am Abblendlicht anschließt. Da das Fernlicht aber signifikant heller sein soll, entsteht ein Kontrast, welcher bei beiden Ansätzen als inhomogen klassifiziert wird. Damit entsteht ein Zielkonflikt beim Einsatz von LEDs als Lichtquelle.

Die Effizienz ist besser als beim Xenon-Modul, da nur die LEDs aktiviert werden, welche für die momentane Lichtverteilung benötigt werden. Dagegen verbraucht das Xenon-Modul dauerhaft die Energie, welche für die Darstellung des kompletten Abblend- und Fernlichts notwendig ist. Allerdings ist die Xenon-Lichtverteilung systematisch homogen, da für die Abblendlichtverteilung ein Teil des schon homogenen Lichtkegels blockiert wird.

Für die Beurteilung der Homogenität von Abblend- und Fernlichtverteilungen zeigt sich insgesamt, dass sowohl die Gradientenmethode als auch die Kontrastanalyse geeignet sind, um verschiedene Scheinwerfersysteme zu bewerten. Dabei ist die Gradientenmethode bei allen lokalen Inhomogenitäten sensitiver, wohingegen die Kontrastmethode linear und langsam abfallende Leuchtdichteverteilungen als homogen bewertet, was bei auslaufenden Leuchtdichten am Rand einer Lichtverteilung eher dem subjektiven Eindruck entspricht.

Da die vorgestellten Lichtverteilungen von Serienscheinwerfern stammen, welche am Ende des Entwicklungsprozesses als ausreichend subjektiv homogen

gelten, scheint der Ansatz der Kontrastanalyse anwendungsnähere Ergebnisse zu liefern.

Analog zur Analyse der Fouriertransformation der Leuchtdichteverteilung wurde diese auch für das Xenon- und LED-System durchgeführt. Dabei wurde die Fernlichtverteilung inklusive Abblendlicht genutzt. Hintergrund ist, dass für das Xenon-Modul mit Walze keine Abbildung von alleinigem Fernlicht möglich ist. Der Vergleich mit der empirischen Bewertungsfunktion sowie den beiden Laserscannermodulen ist in Abb. 5.32 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Fouriertransformation sowohl des Xenon-Fernlichts als auch des LED-Systems deutlich unterhalb der Kurve des ersten, inhomogenen Laserscanners liegen. Es ist keine Periodizität im Frequenzbild erkennbar, was aufgrund der systembedingten Lichtverteilung plausibel ist.

Beide Fernlichtverteilungen haben leichte Ausschläge oberhalb der Bewertungsfunktion. Dies ist auf die Datengrundlage der Systeme zurückzuführen. Beim Beschneiden der Leuchtdichteaufnahme wurde als untere Grenze das Ende der Leinwand gewählt. Dort ist die Leuchtdichte jedoch noch nicht auf den $\frac{1}{e^2}$ Teil der maximalen Leuchtdichte abgefallen. Somit gehen Informationen durch die Faltung mit dem Tukey-Fenster verloren bzw. kommt es zu Artefakten im Frequenzraum der Fouriertransformation. In den Daten der Laserscanner ist dieses Verhalten nicht zu beobachten, weil die Leuchtdichte ohne weitere überlagerte Lichtfunktionen aufgenommen wurde und in alle Raumrichtungen abgefallen ist.

Die Fourieranalyse der Fernlichter eines Xenon- und LED-Scheinwerfers, welche typischerweise keine periodischen Inhomogenitäten aufweisen, zeigt, dass der Vergleich mit einer Bewertungsfunktion diese als homogen bezüglich periodischer Leuchtdichteverläufe klassifiziert. Eine zusätzliche Bewertung der zugrundeliegenden Daten ist aber dennoch notwendig. Somit ist die Bewertung der Fouriertransformation eine Methode, die auf Inhomogenitäten hinweist, aber keine Allgemeingültigkeit bezüglich der Klassifizierung von Scheinwerfer-Lichtverteilungen in homogen und inhomogen liefert.

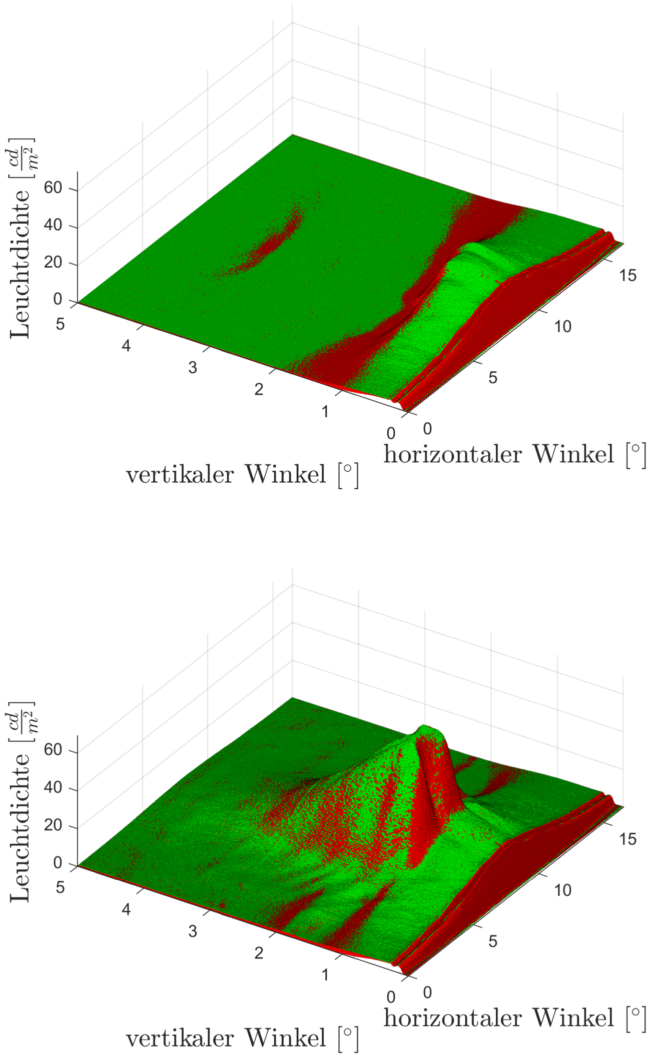



**Abbildung 5.30.:** Lokale Homogenitätsbewertung eines LED-Scheinwerfers mit der Gradientenmethode. Oben: Abblendlichtverteilung. Unten: Fernlichtverteilung

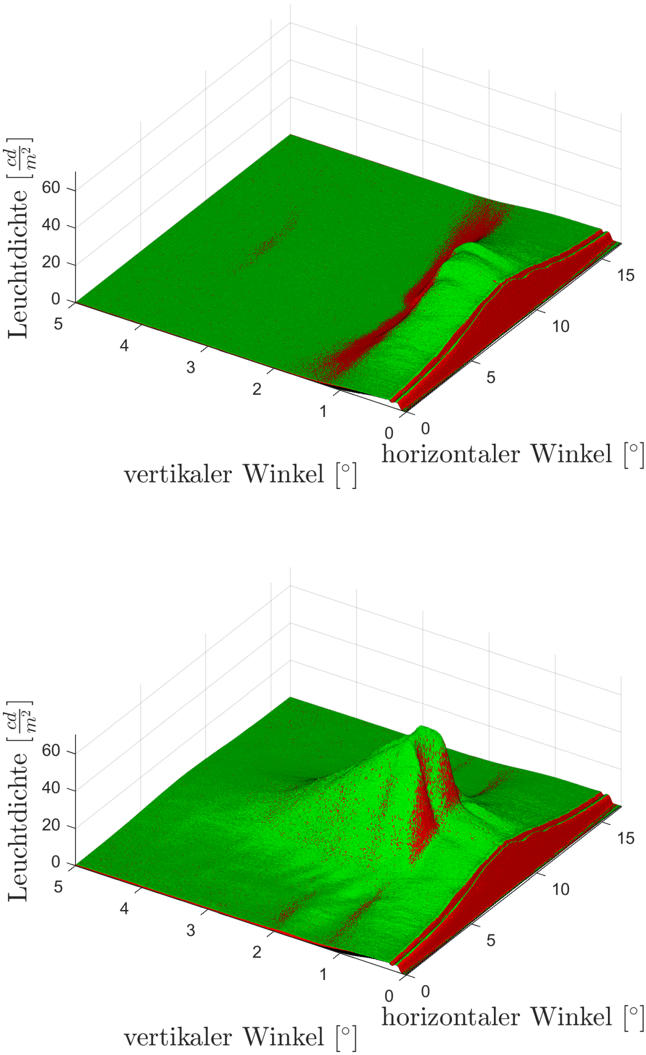



**Abbildung 5.31.:** Lokale Homogenitätsbewertung eines LED-Scheinwerfers mit der Kontrastanalyse. Oben: Abblendlichtverteilung. Unten: Fernlichtverteilung

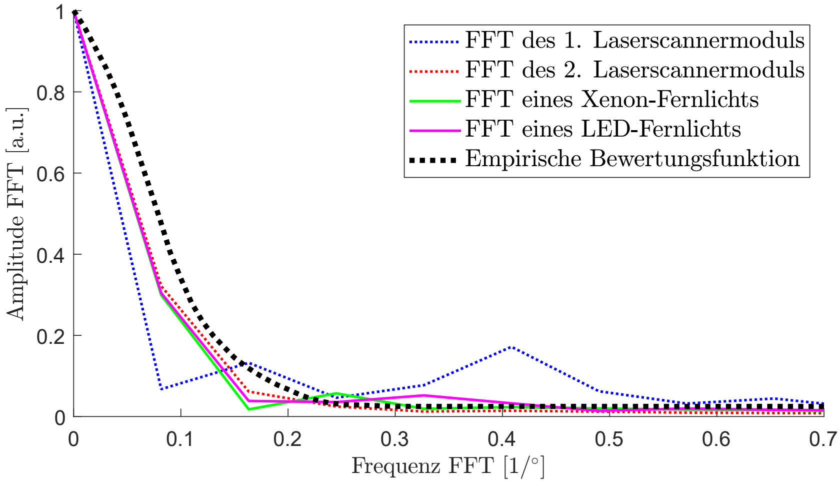



**Abbildung 5.32.:** Schnitte der 2D-Fouriertransformation weiterer Scheinwerfersysteme im Vergleich mit den Laserscannern und der empirischen Bewertungsfunktion.

## 5.5. ERGEBNISDISKUSSION

Die Anwendung der in Kapitel 4 vorgestellten Methoden zur objektiven Bewertung der Homogenität von Leuchtdichteverteilungen verschiedener Scheinwerfersysteme im vorangegangenen Abschnitt zeigt, dass es möglich ist, globale periodische und lokal auftretende Inhomogenitäten zu identifizieren. Es muss allerdings die Frage gestellt werden, ob die Ergebnisse allgemeingültig für jeden Fahrer sind.

ENGEL fasst in [35] die Wahrnehmung visueller Informationen zusammen. Ein relevanter Mechanismus ist dabei die Bildung und Wiedererkennung von Merkmalen eines betrachteten Bildes. Für den Anwendungsfall von Fahrzeugscheinwerfern bedeutet dies, dass einmal erkannte Inhomogenitäten innerhalb einer Lichtverteilung stets wiedererkannt und als störend empfunden werden können. Aus diesem Grund sind die hier vorgestellten Methoden zur lokalen Homogenitätsbewertung auf Basis des Weber-Fechner-Gesetzes entwickelt worden. Demnach sollten keine weiteren, außer den klassifizierten Inhomogenitäten vom

menschlichen Auge wahrzunehmen sein, wodurch auch die Wiedererkennung aufgrund fehlender initialer Wahrnehmung auszuschließen ist.

Kritischer muss die Quelle der Leuchtdichtedaten gesehen werden, auf deren Basis die Homogenitätsbewertung vorgenommen wurde. Die Aufnahmen entstanden für eine ideale Vergleichbarkeit zwischen den Entwicklungsstufen des Laserscannermoduls sowie der verschiedenen Scheinwerfersysteme unter Laborbedingungen im Lichtassistenzzentrum der AUDI AG in Ingolstadt.

Die Projektion der Lichtverteilungen auf eine Leinwand hilft dabei unabhängig von der Fahrsituation zu sein, welche von den verschiedenen Systemen ausgeleuchtet wird und gegebenenfalls intrinsische Inhomogenitäten durch lokal verschiedene Reflexionseigenschaften generiert. Dennoch handelt es sich hierbei um eine statische Bewertung, welche zwar für eine Qualitäts-Einschätzung im Entwicklungsprozess eine Grundlage sein kann, jedoch nicht der tatsächlichen Fahrsituation entspricht. So können sowohl parallele Strukturen, wie zum Beispiel Bäume und MatrixBeam-Segmente oder Zäune und Laserscanner-Kanäle, als auch die Bewegung der Projektionsfläche aufgrund der Fahrdynamik dazu führen, dass Inhomogenitäten in der vom Fahrer betrachteten Leuchtdichteverteilung entstehen oder über die Wahrnehmungsschwelle verstärkt werden.

Die Bewertung der vorgestellten Systeme fokussiert aufgrund des Einsatzgebietes des Laserscanners den Fernlichtbereich. Typischerweise tauchen im Straßenverkehr weniger Reflexionsflächen für das Fernlicht auf, ausgenommen sind Fahrten durch Wälder. Innerorts, wo Häuserwände eine mögliche Projektionsfläche bieten, darf das Fernlicht nicht aktiviert werden und außerorts setzt das Fernlicht oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze des Abblendlichts auf und leuchtet damit vor allem oberhalb des Horizonts.

Für eine allgemeine Anwendung der vorgestellten Methodik muss daher insbesondere das Vorfeld des Fahrzeugs und damit die Ausleuchtung durch das Abblendlicht bewertet werden. Dieser Bereich ist bei Nachtfahrten dauerhaft für den Fahrer sichtbar. So zeigt KLEINKES, dass insbesondere der Bereich von 3 bis 18 m durch den Fahrer für die Beurteilung der Homogenität von Scheinwerferlichtverteilungen betrachtet wird [46].

Ein weiterer Kritikpunkt ist die Datenerhebung in einer festen Distanz zur Projektionsfläche, erneut mit dem Ziel der Vergleichbarkeit der Datensätze. Allerdings

variiert die Leuchtdichte, welche vom Auge wahrgenommen werden kann, mit dem Abstand der Lichtquelle zur Leinwand bzw. der Projektionsfläche in einer Fahrsituation. Damit wird auch die Adaptationsleuchtdichte für verschiedene Abstände unterschiedlich sein und das Resultat der Homogenitätsbewertung gegebenenfalls von den gezeigten Resultaten abweichen.

Die untersuchten Datensätze weisen Leuchtdichten der Scheinwerferlichtverteilungen von circa 30 $\frac{cd}{m^2}$ bis 80 $\frac{cd}{m^2}$ auf. Der Vergleich mit der Weber-Fechner-Kurve aus Abb. 2.5 zeigt, dass bei geringeren Adaptationsleuchtdichten die Kontrastwahrnehmungsschwelle höher liegt. Damit würden Lichtverteilungen bei größerem Abstand und damit geringerer Leuchtdichte auf der Projektionsfläche homogener erscheinen und bewertet werden.

Die vorgestellten Methoden, mit Ausnahme der Fouriertransformation, geben keine absolute Kennzahl aus, welche als Kriterium für ein Scheinwerfersystem bzw. dessen Entwicklungsstand als ausreichend homogen herangezogen werden kann. Der prozentuale Anteil an inhomogen bewerteten Pixeln kann nicht genutzt werden, da natürliche Inhomogenitäten am Rand bzw. Auslaufen einer Lichtverteilung vorkommen können und nicht als inakzeptables Artefakt gelten. Das bedeutet es gibt akzeptable Inhomogenitäten, welche durch Experten als solche klassifiziert werden müssen, was die Objektivität und Allgemeingültigkeit einer Kennzahl nimmt.

Bei dem Ansatz der verglichenen Fouriertransformationen mit einer empirischen Bewertungsfunktion ist eine generelle Klassifizierung in ausreichend homogen oder inhomogen möglich, da sich auf das Kriterium der Bewertungskurve aus bekannten, homogenen Lichtverteilungen verständigt wurde. Das bedeutet jedoch nur, dass innerhalb eines Expertenkreises diese Kurve als Homogenitätskriterium gilt und akzeptiert wird.

Eine allgemeine Gültigkeit ist damit nicht automatisch gegeben, da subjektiv für einzelne Fahrer dennoch Inhomogenitäten erkennbar sein können. Zudem bedarf die Fourieranalyse eine Vorabbetrachtung der zu untersuchenden Daten. Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, kann die falsche Wahl einer notwendigen Fensterfunktion oder typische Charakteristika von Lichtverteilungen wie beispielsweise natürliche Hell-Dunkel-Grenzen, und damit gewollte Kontraste, zu Artefakten in der Fouriertransformation führen. Diese können das Homogeni-

tätskriterium verletzen ohne einen subjektiven Einfluss auf die Homogenität der Leuchtdichteverteilung zu haben.

Grundlage für die Gültigkeit der vorgestellten Methoden ist die lokale Adaptation des Auges, welche mit einer Probandenstudie untersucht wurde. Dabei bestand das Probandenkollektiv vor allem aus fachlich versierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Lichtentwicklung von Audi, welche mit einem erfahrenem Auge einen anderen Blick auf die Aufgabenstellung haben als ein Proband, welcher seltener im Alltag mit der Bewertung von Scheinwerferlichtverteilungen konfrontiert ist.

Zudem lag die Quote von Frauen im Probandenkollektiv nur bei 17 %, was auf ein nicht ausreichend heterogenes Teilnehmerfeld schließen lässt, um eine Allgemeingültigkeit zu erreichen. Die Studienergebnisse können daher nicht als repräsentativ für alle Fahrer in Deutschland oder weltweit angenommen werden. Da aber schon bei Teilnehmern, die hinsichtlich der Lichtbildbewertung geschult sind, keine Abhängigkeit der Inhomogenitäten-Erkennung zur Umgebungsausleuchtung zu erkennen ist, darf davon ausgegangen werden, dass unerfahrene Probanden weniger sensitiv auf die variierten Parameter reagieren. Damit scheint zumindest die Annahme des lokalen Adaptationsverhaltens als Grundlage für die Methoden der Homogenitätsbewertung plausibel.

Für die gesamte Homogenitätsbewertung ist lediglich die Leuchtdichte und damit die vom Auge wahrgenommene Helligkeit als Unterscheidungsmerkmal für eine homogene oder inhomogene Lichtverteilung genutzt worden. Der Eindruck von Inhomogenität kann allerdings auch durch lokale Unterschiede der Lichtfarbe entstehen [132]. Insbesondere für weißkonvertiertes Laserlicht variiert die Farbtemperatur in Bereichen hoher Intensitäten, wie in Abb. 5.18 erkennbar ist. Unter anderem aufgrund dieser Tatsache sind die vorgestellten Methodiken nicht als allgemeingültig anzusehen und müssten um verschiedene Aspekte ergänzt werden.

## KAPITEL 6

# ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die stetige Entwicklung von Lichtsystemen im Automobil hat auch zur Etablierung von Laserlichtquellen in Scheinwerfern geführt. Funktional sind diese bisher auf ein statisches Zusatzfernlicht beschränkt, welches dem Fahrer eine Erkennungsreichweitenverbesserung ermöglicht, allerdings keine Assistenzlichtfunktionen umsetzt. Um die Vorteile der Dynamik zur Umsetzung von adaptiven Funktionen und der Laserlichtquelle zu nutzen, wurde im Förderprojekt iLaS ein Laserscannersystem entwickelt.

Der hier vorgestellte Laserscanner verfolgt einen eindimensionalen quasistatischen Ansatz, bei dem der optische Pfad mehrerer Laserdioden so angeordnet wird, dass diese vertikal übereinander auf einen Mikrospiegel treffen. Dieser erzeugt durch eine horizontale Scanbewegung eine ausgedehnte Lichtverteilung auf dem Weißlichtkonverter, welche durch Anpassen der Spiegelsteuerung für die Umsetzung verschiedener Lichtfunktionen verändert werden kann. Eine zusätzliche horizontale Auflösung wird durch das individuelle Deaktivieren einzelner Laserdioden realisiert. Das System konnte prototypisch in einen Scheinwerfer und Versuchfahrzeug integriert und erprobt werden, wie in Abb. 6.1 dargestellt. Die somit ermöglichte Funktionsentwicklung fokussierte sich auf adaptive Lichtfunktionen im Ferntlichtbereich.

Zur technologischen Bewertung wurde dieses Laserscannersystem mit anderen adaptiven Scheinwerfersystemen verglichen sowie Vor- und Nachteile aufgezeigt. Der Laserscanner zeichnet sich vor allem durch eine hohe Effizienz der eingesetzen Energie aus, da die verfügbare Lichtmenge durch die Anpassung der Spiegelbewegung ohne Verluste so verteilt werden kann, wie es für die entsprechende Funktion oder Fahraufgabe von Vorteil ist.

Der Übergang zwischen verschiedenen Lichtverteilungen ist dabei fließend, weil die quasistatische Ansteuerung des Mikrospiegels eine hohe Wiederholungs-

rate der individuellen Zwischenlichtbilder zweier Lichtfunktionen ermöglicht. Diese Besonderheit wird anhand der etablierten adaptiven Lichtassistenzfunktionen Kurvenlicht, Autobahnlicht sowie blendfreiem Fernlicht aufgezeigt. Die Elektronikarchitektur zur Ansteuerung des Laserscannersystems und Umsetzung der vorgestellten Lichtfunktionen entspricht einem prototypischen Aufbau, wie er etabliert in der Vorentwicklung eingesetzt wird. Dabei zeigt sich, dass der Übergang in eine Serienarchitektur durch die Anwendung von bekannten Entwicklungsprozessen möglich wäre.

Eine besondere Rolle bei dem Laserscannersystem kommt der Betrachtung der Lasersicherheit zu. Die Laserlichtquellen sollen auch aktiviert bleiben, wenn sich andere Verkehrsteilnehmer in der Nähe des Egofahrzeugs befinden, welches mit einem Laserscannerscheinwerfer ausgestattet ist.

Eine Worst-Case-Betrachtung zeigt, dass beim Zerstören des Weißlichtkonverters und damit direkten Austritts der Laserstrahlung ab einem Abstand von knapp 6 m keine Gefährdung der Haut sowie Augen vorliegt. Die Klassifizierung nach der aktuellen Lasersicherheitsnorm resultiert in der Laserschutzklasse 1, da die Bedingungen für eine Nutzung der Laserlichtquelle als Lampenersatz durch die Weißlichtkonvertierung und Abstrahlcharakteristik vorliegen. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass bei aktivierten Laserdioden dauerhaft eine Scanbewegung des Mikrospiegels vorliegt.

Aus der Einordnung des Laserscanners im Kontext der Lasersicherheit ergeben sich daher zwei Anforderungen. Zum einen ist eine Überwachung der Spiegelbewegung notwendig, damit bei einem erkannten Stillstand die Laserdioden umgehend deaktiviert werden. Für eine quasistatische Ansteuerung ist eine Feedbackschleife allerdings grundlegend notwendig, damit ausgehend von der aktuellen Position die treibende Kraft für das Erreichen der Sollposition im nächsten Zeitschritt bestimmt werden kann.

Zum anderen ist es notwendig den Weißlichtkonverter auf Unversehrtheit zu überwachen. Idealerweise geschieht dies ohne eine Aktivierung der Laserlichtquelle, zum Beispiel durch eine Überwachung eines Stromes innerhalb einer Metallstruktur auf dem Konverter [28]. Bei einer Beschädigung und einer potentiellen Gefahr von austretender Laserstrahlung würde somit ein offener Stromkreis detektiert werden ohne die Laserdioden initial zu aktivieren.

Während der Entwicklung des Laserscanners hat sich gezeigt, dass die Anordnung der Laserstrahlen auf dem Konverter und die Streucharakteristik innerhalb des Konverters zu einer deutlich wahrnehmbaren Abgrenzung der Laserkanäle im resultierenden Lichtbild führen. Die Fragestellung nach einem Homogenitätskriterium wurde daher mit verschiedenen Ansätzen bearbeitet.

Die Fourieranalyse von Leuchtdichteverteilungen bietet dabei die Möglichkeit, periodische Inhomogenitäten in der Stärke ihrer Ausprägung zu bewerten und mit einer empirischen Bewertungskurve zu vergleichen. In der Anwendung auf zwei Entwicklungsstände des Laserscanners, welche sich bezüglich der Homogenität deutlich unterscheiden, zeigt sich, dass der Ansatz der Fourieranalyse ein geeignetes Mittel ist.

Dieser Ansatz sollte jedoch nicht alleinig genutzt werden, um die Homogenität einer Lichtverteilung zu klassifizieren. Zum einen können Artefakte im Ergebnis zu dem Schluss führen, dass das Kriterium nicht erfüllt wird. Diese basieren aber auf dem Charakter einer Lichtverteilung und gehen nicht mit einer inakzeptablen Inhomogenität einher. Zum anderen kann mit der Fouriertransformation nur eine gesamte Lichtverteilung global bewertet werden und liefert keine Aussage über lokale Inhomogenitäten, welche erkennbar und als störend klassifiziert werden.

Daher wurden zwei weitere Methoden entwickelt, welche eine Leuchtdichteverteilung an jedem Ort lokal untersuchen und ein Ergebnis liefern, ob räumlich begrenzte Leuchtdichteunterschiede erkennbar sind oder nicht. Dabei wird entweder der lokale Gradient gebildet oder der Leuchtdichteunterschied eines zu bewertenden Pixels zur mittleren Leuchtdichte seiner direkten Umgebung bestimmt.

Grundlage für die Klassifizierung ist die Weber-Fechner-Kurve, welche die Erkennungsschwelle in Abhängigkeit der Adaptationsleuchtdichte des Auges beschreibt. Lokale Leuchtdichteunterschiede der aufgenommenen Daten der Laserscanner werden somit als erkennbar und damit inhomogen oder nicht wahrnehmbar und damit homogen eingeordnet. Der Vergleich der Ergebnisse beider Entwicklungsstufen zeigt, dass die Auslegung der Optiken innerhalb des Laserscannermoduls homogen erfolgen kann. Ebenso zeigt die Anwendung aller Methoden auf Leuchtdichteverteilungen von Scheinwerfersystemen im

Serieneinsatz, dass erwartete Kontraste als Inhomogenität erkannt werden, wohingegen homogene Bereiche eines Abblend- oder Fernlichts auch als solche klassifiziert werden.

Für die entwickelten Methoden wird die Annahme getroffen, dass die Adaptation des Auges auf den Bereich stattfindet, in welchem die Homogenität bewertet werden soll. Um die Gültigkeit und damit die Basis für die Anwendung der Methodiken zu prüfen, wurde eine Probandenstudie durchgeführt. Dabei wurde die Erkennungsschwelle von hellen sowie dunklen Inhomogenitäten in Abhängigkeit von der Größe der beleuchteten Umgebungsfläche ermittelt. In den Ergebnissen zeigt sich kein Zusammenhang, vielmehr war die Erkennungsschwelle stets gleichbleibend. Daraus wird geschlossen, dass die Annahme für die Anwendung der lokalen Homogenitätsbewertung plausibel ist.

Für eine zukünftige Bewertung der Homogenität von Scheinwerferlichtverteilungen kann die gemeinsame Anwendung der Fourieranalyse für globale, periodische Inhomogenitäten und Kontrastanalyse für lokale Leuchtdichteverläufe innerhalb einer Lichtverteilung empfohlen werden.

Ob die Anwendung der vorgestellten Ansätze zur Homogenitätsbewertung jedoch allgemeingültige Ergebnisse liefert, ist kritisch zu hinterfragen. Die Resultate und daraus hervorgehend die Interpretation der Methoden als plausibles Werkzeug basieren auf statischen Leuchtdichtedaten, welche in einer Laborumgebung erhoben wurden. Damit ist eine erste Bewertung in der Entwicklungsphase von Scheinwerfersystemen möglich, jedoch lassen die Ergebnisse keinen Rückschluss auf den sehr subjektiven Homogenitätseindruck von Fahrern während Nachtfahrten zu.

Auf diese Arbeit aufbauend sind Analysen von Leuchtdichteverteilungen basierend auf der Reflexion von Scheinwerferlicht an Straße, Bäumen und weiteren Objekten in der Straßenumgebung notwendig. Zudem müssen diese Ergebnisse mit einer breit aufgestellten Probandenstudie verglichen werden, in welcher nach vergleichbaren Kriterien Inhomogenitäten lokalisiert werden können. Erst dann können die Resultate der Homogenitätsanalyse mit den hier vorgestellten Methoden als gültig und Anforderung im Entwicklungsprozess von Scheinwerfersystemen eingesetzt und gefordert werden.

Für die Fragestellung der Homogenität des Laserscannerscheinwerfers während des kooperativen Forschungsprojektes iLaS konnten die Methoden gewinnbrin-

gend und hilfreich eingesetzt werden, sodass Laserscannermodule resultierten, die auch in der Beurteilung durch lichttechnische Experten als akzeptabel homogen gelten.

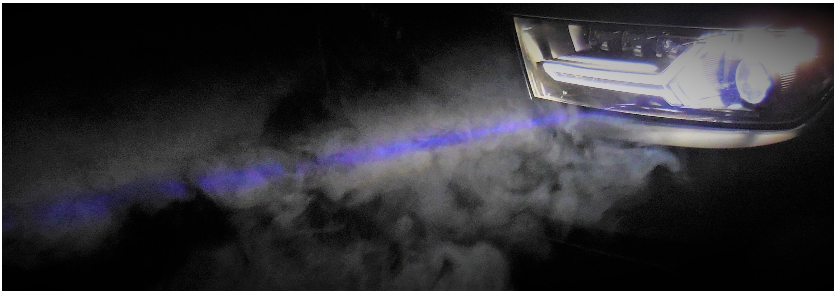


**Abbildung 6.1.:** Foto des entwickelten Laserscannerscheinwerfers. Der Nebel vor dem Scheinwerfer ermöglicht die Erkennung des schmalen Winkelbereichs des Laserscanners mit erhöhtem Blauanteil, welcher sich vom weißen Abblendlicht abgrenzt.

# LITERATURVERZEICHNIS


[1] A. C. Europa, „ACE Studien zu Verkehrsrecht und Verkehrssicherheit," Online, 2011. [Online]. Available: https://www.ace.de/fileadmin/user_uploads/Der_Club/Dokumente/Verkehrspolitik/Handout-Booklet-ACE-Studien.pdf

[2] M. Lerner, M. Albrecht, und C. Evers, *Das Unfallgeschehen bei Nacht*. Bundesanstalt für Straßenwesen, 2005.

[3] S. Werber, *Unfälle in der Dunkelheit*, Serie SCHRIFTENREIHE VERKEHRSSICHERHEIT. Deutscher Verkehrssicherheitsrat e.V., 2003, Vol. 12.

[4] B. Fries, C. Gut, T. Laudenbach, und M. Mühlmeier, „Laserlicht für den Rennwagen Audi R18 e-tron quattro," *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift*, Vol. 116, Nr. 6, S. 38–43, 2014.

[5] S. Weber, A. Buck, und C. Amann, „Laserlicht im BMW i8 Design, Systemintegration und Test," *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift*, Vol. 116, Nr. 9, S. 60–65, 2014.

[6] B. Willeke, „Laserscheinwerfer für adaptive Fahrlichtfunktionen im Kfz," Ph.D. dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2016.

[7] C. Basu, G. Kloppenburg, A. Wolf, M. Wollweber, B. Roth, und R. Lachmayer, „A High Power Blue Diode Laser Pumped White Light Source Using Remote Phosphors," in *Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, Vol. 15, Darmstadt, 09 2013.

[8] F. Träger, *Springer handbook of lasers and optics*. Springer Science & Business Media, 2007.

[9] M. Uchida, Y. Nakazato, E. Ueki, und Y. Kita, „Subjective an objective performance of laser headlamps," in *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, 2015, S. 395–404.

[10] Y. Li, M. Knöchelmann, und R. Lachmayer, „High-resolution headlamps: Innovative functionalities and the potential of using laser diodes as light sources," in *7th International Forum on Automotive Lighting (IFAL)*, Shanghai, Juni 2019.

[11] R. Lachmayer, A. Wolf, und G. Kloppenburg, „System efficiency of laser-based white light," *Advanced Optical Technologies*, Vol. 3, Nr. 5-6, S. 523 – 530, Dez. 2014.

[12] J. Kobbert, K. Kosmas, D. Polin, D. Englisch *et al.*, „Field Test of Visibility distances and recognition rates—comparison of LED and Laser systems," in *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, 2015, S. 365–374.

[13] Audi und A. Lighting, „Abstimmungen Laserfernlicht," Juni 2015, Interne Kommunikation.

[14] J. Wilhelmy und C. Gut, „Laser Headlamps. Key factors and improvement," in *Proceedings of ISAL, Darmstadt*, 2015.

[15] M. Hamm, „Safety Improvement Generated by Pioneering New Matrix and Direction Indicator Functionalities," in *Proc. of the 10th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, Vol. 15, 2013, S. 319–329.

[16] S. Berlitz, M. Hamm, und C. Funk, „Matrix-LED-Scheinwerfer von Audi," *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift*, Vol. 116, Nr. 3, S. 10–15, 2014.

[17] DGUV, *Unfallverhütungsvorschrift „Laserstrahlung" GUV-VB2 vom November 1987 in der Fassung vom Januar 1997*, 2007. Aufl., Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), Glinkastraße 40 10117 Berlin, 1997.

[18] uvex Academy, „Laserschutzbeauftragter nach OStrV §5 (bisher DGUV Vorschrift 11 bzw. BGV B2)," Seminar und Zertifikat akkreditiert durch die Berufsgenossenschaft auf der Basis der UVV, 2017.

[19] Bundesgesetzblatt, „Gesetz zur Revision des Übereinkommens vom 20. März 1958 über die Annahme einheitlicher Bedingungen für die Genehmigung der Ausrüstungsgegenstände und Teile von Kraftfahrzeugen und über die gegenseitige Anerkennung der Genehmigung," Vol. Teil II, Nr. 21, S. 998, Mai 1997.

[20] E. IEC 60825, „IEC 60825–1: Safety of laser products - Part 1: Equipment classification and requirements," Mai 2014.

[21] C. (CDRH), „Guidance on Laser Products - Conformance with IEC 60825-1 and IEC 60601-2-22 (Laser Notice No. 50)," Juni 2007.

[22] E. IEC 60825, „IEC 60825–1: Safety of laser products - Part 1: Equipment classification and requirements," Mar. 2007.

[23] IEC62471, „IEC 62471:2006 Photobiological safety of lamps and lamp systems," July 2006.

[24] S. (SAPRC), „GB 7247.1–2012, Safety of laser products - Part 1: Equipment classification and requirements," Dez. 2012.

[25] K. Schulmeister, „The new edition of the international laser product safety standard IEC 60825-1," *White Paper; Seibersdorf Labor GmbH*, 2017.

[26] K. Schulmeister und J. Daem, „Classification of laser illuminated light sources under IEC 60825-3," in *International Laser Safety Conference*, Vol. 2017, Nr. 1. LIA, 2017, S. 174–180.

[27] C. Gut und W. Huhn, „A Safety Concept for Laser Headlamps," in *The 2nd International Forum on Automotive Lighting IFAL*. Shanghai: Fudan University, 2014.

[28] G. Forster und M. Engl, „Conversion module with lead frame," Aug. 1 2019, US Patent App. 16/258,683.

[29] G. D. Quinn, *Fractography of ceramics and glasses*. National Institute of Standards and Technology Washington, DC, 2007.

[30] V. Popp, „Temporal coherence properties of laser modules used in headlamps determined by a Michelson interferometer," 2017, Project thesis.

[31] V. Popp, P. Ansorg, B. Fleck, und C. Neumann, „Temporal coherence properties of laser modules used in headlamps determined by a Michelson interferometer," *Advanced Optical Technologies*, Vol. 9, Nr. 6, 2020.

[32] H. Eichler und J. Eichler, *Laser: Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. Springer Berlin Heidelberg, 2010.

[33] E. Hecht, *Optik*, Serie De Gruyter - Studium. Oldenbourg, 2009.

[34] H. Naumann, G. Schröder, und M. Löffler-Mang, *Handbuch Bauelemente der Optik: Grundlagen, Werkstoffe, Geräte, Messtechnik*. Hanser, Carl, 2014.

[35] A. K. Engel, „Prinzipien der Wahrnehmung: das visuelle System," *Kopf-Arbeit-Funktionen und kognitive Leistungen*, S. 181–207, 1996.

[36] U. Ansorge und H. Leder, „Visuelle Wahrnehmung: Farbe und Kontrast," in *Wahrnehmung und Aufmerksamkeit*. Springer, 2017, S. 85–100.

[37] E. H. Weber, „De pulsu, resorptione, auditu et tactu annotationes anatomica˜ et physiologic,˜, Leipsic, 1834. Author's summary: Ueber den Tastsinn," *Arch. Anat. u. Physiol*, Vol. 152, 1835.

[38] S. Hecht, „The visual discrimination of intensity and the Weber-Fechner law," *The Journal of general physiology*, Vol. 7, Nr. 2, S. 235–267, 1924.

[39] G. T. Fechner, *Über ein psychophysisches Grundgesetz und dessen Beziehung zur Schätzung der Sterngrössen*. Hirzel, 1858, Vol. 4.

[40] S. Hecht, „A Theory of Visual Intensity Discrimination," *Journal of General Physiology*, Vol. 18, Nr. 5, S. 767–789, 05 1935.

[41] C. Hupe, „Homogenitätsbewertung flächiger Lichtquellen und Leuchten," *Lux Junior*, 2013.

[42] D. Rauh, „Entwicklung einer Homogenitätsbeurteilung für LED-Rückleuchten auf Basis der menschlichen Wahrnehmung," 2011, Bachelorarbeit.

[43] H. Kiel, „Bewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern mit Lichtsimulation," Ph.D. dissertation, Universitätsbibliothek Ilmenau, 2012.

[44] N. Pfullmann, C. Studeny, und B. Richter, „A unified homogeneity criterion for rear lamps," *Advanced Optical Technologies*, Vol. 6, Nr. 1, S. 25–29, 2017.

[45] J. Locher, S. Köhler, und A. Dahlmann, „Homogeneity of Headlamp Light Distributions," in *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, 2017, S. 725–732.

[46] M. Kleinkes, „Objektivierte Bewertung des Gütemerkmals Homogenität für Scheinwerfer-Lichtverteilungen," Ph.D. dissertation, 2003.

[47] S. Paroni, A. Londero, und M. Svettini, „Luminance homogeneity of rear-lamps lighting functions: comparison of some OEMs analytical evaluation criteria," in *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, Vol. 16, 2015, S. 555.

[48] P. Downen, „A closer look at flat-panel-display measurement standards and trends,” *Information Display*, Vol. 22, Nr. 1, S. 16–21, 2006.

[49] A. B. Watson, „The spatial standard observer: A human vision model for display inspection,” in *SID Symposium Digest of Technical Papers*, Vol. 37, Nr. 1. Wiley Online Library, 2006, S. 1312–1315.

[50] B. Schlag, I. Petermann, G. Weller, und C. Schulze, *Mehr Licht-Mehr Sicht-Mehr Sicherheit?: Zur Wirkung verbesserter Licht-und Sichtbedingungen auf das Fahrerverhalten*. Springer-Verlag, 2008.

[51] C. Schierz, „Die Psychophysik der Wahrnehmungsschwelle: Von Weber und Fechner zur Signaldetektionstheorie,” *Tagungsband, Lux Junior*, 2013.

[52] C. S. Monroe, „Oscillating lamp,” Patent, Okt. 11, 1938, US Patent 2,133,106.

[53] N. P. Demas, „Scan synthesized beam headlamp,” Patent, Dez. 7, 1982, US Patent 4,363,085.

[54] P. Soardo, „Headlamp for motor vehicles with programmable light distribution,” Patent, Sep. 19, 1989, US Patent 4,868,721.

[55] A. Tschermak-Seysenegg, *Einführung in die physiologische Optik*. Springer Vienna, 2013.

[56] M. Götz, R. Kauschke, E. Härmens, und K. Eichhorn, „Scannender Scheinwerfer,” in *DGaO Proceedings*, 2004.

[57] F. Senger, T. v. Wantoch, C. Mallas, J. Janes, U. Hofmann, B. Wagner, und W. Benecke, „MEMS scanning mirrors for high power laser display and lighting applications,” in *The 4th Laser Display and Lighting Conference (LDC’15), Yokohama, Japan, Apr*, 2015.

[58] U. Hofmann, T. v. Wantoch, G. Eberhardt, I. Kinski, M. Moeser, F. Senger, und C. Mallas, „Dynamic shaping of the basic intensity profile of adaptive laser headlights based on resonant MEMS scanning mirrors,” in *VISION - Vehicle and Infrastructure Safety Improvement in Adverse Conditions and Night Driving*, 2016.

[59] J. Roth, B. Meyer, und S. Thomschke, „Laser scanning unit for light symbol projection,” in *VISION - Vehicle and Infrastructure Safety Improvement in Adverse Conditions and Night Driving*, 2014.

[60] J. Roth, J. Wallaschek, G. Kloppenburg, R. Lachmayer, B. Meyer, und S. Thomschke, „RGB-Laser Scanning Module for Onroad Projection," in *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, Vol. 16, 2015, S. 385–394.

[61] C. Gut, „Laserbasierte hochauflösende Pixellichtsysteme," Ph.D. dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2017.

[62] S. Yamamura, H. Tanaka, N. Sato, und T. Muramatsu, „Glare-free High Beam with Beam-scanning," in *Proc. of the 10th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, Vol. 15, 2013, S. 331–338.

[63] B. f. B. u. F. BMBF, „Intelligentes Laserlicht für kompakte und hochauflösende adaptive Scheinwerfer (iLaS)," Projektsteckbrief Photonik Forschung Deutschland, 2014. [Online]. Available: https://www.photonikforschung.de/media/beleuchtung-und-led/pdf/iLaS_IntellBel_Projektsteckbrief_Korr2017-09_bf_C3.pdf

[64] R. Hying, A. Nauen, T. Reiners, S. Haneder, und T. Dobbertin, „Laser Activated Remote Phosphor—the Way to Ultra-high Luminance in Headlamps," in *Proc. of the 10th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, 2013, S. 121–125.

[65] G. Bischopink, „MEMS-Sensors for Automotive Business," in *MEMS Engineer Forum 2016*, Serie 8th, Tokyo, 2016.

[66] A. Petersen, J. Hager, C. Gut *et al.*, „Challenges for MEMS based Scanning Laser System," in *Proc. Int. Symp. on Automotive Lighting 2015*, 2015.

[67] P. Ansorg, J. Hager, B. Reisinger, A. Stötzler, P. Jahn, T. Mitterlehner, und M. Seitz, „Advantages of laser scanners for automotive headlamps," in *VISION - Vehicle and Infrastructure Safety Improvement in Adverse Conditions and Night Driving*, 2016.

[68] P. Ansorg, M. Fischer, C. Möckel, und C. Neumann, „Technologische und physiologische Bewertung eines hochaufgelösten Laserscanner-Scheinwerfersystems," *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*, Vol. 8, S. 23–34, 2018.

[69] Audi und Osram, „Datenblatt OSRAM: PLPT9 450-Familie," 2016, Interne Kommunikation.

[70] H. Nitsche, F. N. Njimonzie, W. Schock, J. Muchow, H. Grutzeck, und Z. Lestyan, „Micromirror," United States of America Patent US20 150 036 203A1, Feb. 5, 2015, US Patent App. 14/364,991.

[71] Audi und Bosch, „iLaS Statustreffen," Interne Kommunikation.

[72] Audi und Osram, „iLaS Projektmeeting," 2015, Interne Kommunikation.

[73] J. Hager, M. Seitz, C. Bemmer, P. Jahn, P. Ansorg, O. Woisetschläger, F. Buchmann, D. Sprenger, M. Vogl, O. Hering *et al.*, „Handling 17W of scanning laser power–three years of exploration in the iLaS project," in *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*. Herbert Utz Verlag, 2017, S. 271.

[74] A. L. Augustoni, „Approximation Methods for Estimating the Eye-Safe Viewing Distances, with or without Atmospheric Transmission Factors Considered, for Aided and Unaided Viewing Conditions," Sandia National Labs., Albuquerque, NM (US); Sandia National Labs . . . , Tech. Rep., 2002.

[75] C. Schmidt und C. Wilks, „High Definition Concepts for Next Generation ADB Module," in *Proceedings of Int. Conference on Vehicle and Infrastructure Safety Improvement in Adverse Conditions and Night Driving (VISION 2014), Versailles, France*, 2014.

[76] C. Funk, J. Reim, und S. Omerbegovic, „New world of lighting based driver assistance systems–'Good bye low beam'," in *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, Vol. 16. Herbert Utz Verlag, 2015, S. 131–136.

[77] J. Moisel, „Requirements for future high resolution ADB modules," in *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, Vol. 16. Herbert Utz Verlag, 2015, S. 161–169.

[78] M. Reinprecht, N. Winterer, und P. Hartmann, „Solution Paths towards High-Resolution ADB-Systems," in *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, Vol. 16. Herbert Utz Verlag, 2015, S. 177–186.

[79] M. Courcier, B. Reiss, und V. Sanchez, „New Front lighting Possibilities through High Definition Digital Lighting," in *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, Vol. 16. Herbert Utz Verlag, 2015, S. 211–220.

[80] B. Reisinger, M. Reinprecht, J. Pürstinger, A. Moser, G. Böhm, und F. Bauer, „Potentials of MEMS-based scanners and DMD arrays with high luminance LED and Laser light sources," in *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, Vol. 16, 2015, S. 473.

[81] V. R. Bhakta und B. Ballard, „High resolution adaptive headlight using Texas Instruments DLP® technology," in *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting*, Vol. 16, 2015, S. 483–494.

[82] B. Willeke, F. Schüler, F. Kley, und G. Fischer, „High Resolution Headlamp – Investigation towards a RGB-Laser LCD Backlight," in *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, Vol. 16, 2015, S. 531.

[83] T. Masuda, Y. Shibata, M. Hayakawa, und S. Yamamura, „Examination of the effectiveness of road surface drawing headlamps," in *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, Vol. 16, 2015, S. 503.

[84] X. Morel, S. Sommerschuh, H. El Idrissi, und B. Reiss, „From discrete glare free to full HD lighting," in *VISION - Vehicle and Infrastructure Safety Improvement in Adverse Conditions and Night Driving*, 2016.

[85] N. Pfullmann, A. Thiel, M. Thamm, R. Plöger, G. Kloppenburg, A. Wolf, und R. Lachmayer, „From mechanical adb systems to high resolution headlamps-new opportunities of novel headlight systems," in *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, 2017, S. 357–365.

[86] P. Ansorg und W. Huhn, „The Future of Automotive Lighting with Laser Technology," in *Laser Display and Lighting Conference 2018 (LDC'18)*, Vol. 7, Yokohama, Japan, 2018.

[87] M. Hamm, „Innovative Lichtquellen für Fahrzeuge," *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift*, Vol. 113, Nr. 1, S. 8–15, 2011.

[88] S. Berlitz, C. Funk, R. Horst, und A. Rosenow, „Assistenzsysteme zur Verbesserung der Sicht bei Tag und Nacht," *ATZextra*, Vol. 15, Nr. 11, S. 192–197, 2010.

[89] B. Hummel, „Blendfreies LED-Fernlicht," Ph.D. dissertation, 2010.

[90] T. Gocke, S. Weber, und M. Sieler, „Lighting innovations of future BMW vehicles," in *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, Vol. 16, 2015, S. 19–28.

[91] J. Roslak, „Entwicklung eines aktiven Scheinwerfersystems zur blendungsfreien Ausleuchtung des Verkehrsraums," Ph.D. dissertation, 2005.

[92] C. Gut, A. Petersen, P. Jahn *et al.*, „Das ideale Licht: Mikromechanischer Matrix Laser Scheinwerfer," in *ELIV-Kongress zur Fahrzeugelektronik: Tagungsband. Düsseldorf: VDI Verlag*, 2015, S. 277–292.

[93] S. Grötsch, A. Pfeuffer, T. Liebetrau, H. Oppermann, M. Brink, R. Fiederling, I. Möllers, und J. Moisel, „Integrated High Resolution LED Light Sources in an AFS/ADB Headlamp," in *Proceedings International Symposium on Automotive Lighting*, 2015, S. 241–250.

[94] S. Grötsch, A. Pfeuffer, A. Günther, und G. Pan, „LED based matrix concepts ranging from entry ADB up into the high resolution ADB/AFS Application," in *VISION - Vehicle and Infrastructure Safety Improvement in Adverse Conditions and Night Driving*, 2016.

[95] J. Trommer, T. Feil, D. Weissenberger, R. Fiederling, und M. Rayer, „New Possibilities with $\mu$AFS modules - The Path to High-Resolution Full-Matrix Headlamps," in *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, Vol. 17, 2017, S. 333–342.

[96] C. Gut, I. Rotscholl, und C. Neumann, „Theoretische Leistungs-und Effizienzanalyse laserbasierter Pixellichtsysteme," *VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*, 2014.

[97] Y. Seko und T. Saito, „Vehicle headlamp," Patent, Jan. 15, 1991, US Patent 4,985,816.

[98] B. f. B. u. F. BMBF, „Volladaptive Lichtverteilung für eine intelligente, effiziente und sichere Fahrzeugbeleuchtung (VoLiFa2020)," Projektsteckbrief Photonik Forschung Deutschland, 2014. [Online]. Available: https://www.photonikforschung.de/media/beleuchtung-und-led/pdf/Projektsteckbrief_VoLiFa2020-Korr2017-09_bf_C1.pdf

[99] H. Hesse *et al.*, „BMBF-Project VOLIFA 2020–High resolution light distribution by using a LCD," in *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, Vol. 16, 2015, S. 495.

[100] C. Schmidt, „BMBF-Project VoLiFa2020 - Results of the test car integrated LCD headlamp development," in *VISION - Vehicle and Infrastructure Safety Improvement in Adverse Conditions and Night Driving*, 2016.

[101] D. Duhme und B. Fischer, „Next Generation LCD Module," in *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, 2017, S. 11–18.

[102] W. P. Bleha und L. A. Lei, „Advances in liquid crystal on silicon (LCOS) spatial light modulator technology," in *Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics VII*, Vol. 8736. International Society for Optics and Photonics, 2013, S. 87360A.

[103] G. Lazarev, A. Hermerschmidt, S. Krüger, und S. Osten, „LCOS spatial light modulators: trends and applications," *Optical Imaging and Metrology: Advanced Technologies*, S. 1–29, 2012.

[104] P. Ansorg, B. Höfer, N. Danz, und U. Zeitner, „Bending the Light with LCoS: ADB by Phase-modulated RGB Laser," in *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*. Herbert Utz Verlag, 2017, S. 167.

[105] U. N. (UN), *Uniform provisions concerning the approval of adaptive front-lighting systems (AFS) for motor vehicles*, UN Std. Addendum 122: Regulation No. 123, Rev. 2, Okt. 1995.

[106] M. Hamm, „System Strategies for Adaptive Lighting Systems," *PROCEEDINGS OF PAL 2001-PROGRESS IN AUTOMOBILE LIGHTING, HELD LABORATORY OF LIGHTING TECHNOLOGY, SEPTEMBER 2001. VOL 8*, 2001.

[107] J. Seuss und D. Stryschik, „Steuerungselektronik für dynamisches Kurvenlicht," *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Vol. 105, Nr. 6, S. 598–601, Jun 2003.

[108] W. Hendrischk, M. Grimm, und F.-J. Kalze, „Adaptive Scheinwerfer," *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Vol. 104, Nr. 11, S. 968–973, Nov 2002.

[109] F. Barmeyer und C. Funk, „System und Verfahren zur Steuerung eines Fahrzeugscheinwerfers," Germany Patent DE102 014 003 544A1, 2014.

[110] C. Funk, *Heterogene Sensordatenfusion für eine prädiktive Lichtsteuerung*. Cuvillier Verlag, 2013.

[111] M. Hamm, „Adaptive lighting functions history and future-performance investigations and field test for user's acceptance," SAE Technical Paper, Tech. Rep., 2002.

[112] M. Hamm und E.-O. Rosenhahn, „Facts and Feelings Regarding Motorway Light in Adaptive Headlamp Systems," in *SAE Technical Paper*. SAE International, 03 2003.

[113] J. H. Sprute, „Entwicklung lichttechnischer Kriterien zur Blendungsminimierung von adaptiven Fernlichtsystemen," Ph.D. dissertation, Technische Universität, 2012.

[114] J. D. Bullough, „Adaptive high beam systems: Visual performance and safety effects," SAE Technical Paper, Tech. Rep., 2014.

[115] M. Hamm, „Research Status on ADB Safety Features," in *Proc. 12th International Symposium on Automotive Lighting*, 2017, S. 211–220.

[116] A. Totzauer, „Kalibrierung und Wahrnehmung von blendfreiem LED-Fernlicht," Ph.D. dissertation, 2013.

[117] K. Diekmann und T. Gerloff, „Luminance Homogeneity of OLED Lighting Tiles - A Route to Standartisation," *The OSADirect Magazine*, Vol. 2, S. 24–27, Sep. 2009.

[118] S. Kleinkes, Michael; Völker, „Luminance-Based Homogeneity Rating for Headlamp Light Distributions," in *PAL 2003 Symposium, TU Darmstadt, 23.-24. September 2003*, Vol. 10. TU Darmstadt, 2003, S. 531–542.

[119] C. Möckel und M. Krautscheid, „Bewertung der Homogenität von MxB Lichtverteilungen als Vorlage für Audi Lastenhefte," Mar. 2015, Interne Kommunikation.

[120] L. Weber, „Praktikumsbericht zum Pflichtpraktikum in der Lichtentwicklung bei der AUDI AG," Mar. 2017, Praktikumsbericht.

[121] J. Walter, „Charakterisierung des Lichtbildes von Scheinwefersystemen bezüglich Homogenität," Mar. 2018, Bachelorarbeit.

[122] A. Ehrmann und T. Błachowicz, „Das menschliche Auge: Tiefenschärfe und Auflösungsvermögen," *Physik in unserer Zeit*, Vol. 46, Nr. 3, S. 136–139, 2015.

[123] M. Fischer, „Homogenitätsbewertung eines dynamischen Laserscheinwerfer-Systems," Sep. 2017, Masterarbeit.

[124] W. Boron und E. Boulpaep, *Medical Physiology, 2e Updated Edition E-Book*. Elsevier Health Sciences, 2012.

[125] J. Große-Knetter und P. Schaaf, *Das Physikalische Praktikum Band I: Handbuch 2018/2019 für Studentinnen und Studenten der Physik*. Universitätsverlag Göttingen, 2019, Nr. Bd. 1.

[126] J. Müsseler, M. Rieger, und M. Lay, *Allgemeine Psychologie*, Serie Allgemeine Psychologie. Springer Berlin Heidelberg, 2016.

[127] H. Hagendorf, J. Krummenacher, H. Müller, und T. Schubert, *Allgemeine Psychologie für Bachelor: Wahrnehmung und Aufmerksamkeit. (Lehrbuch mit Online-Materialien)*, Serie Allgemeine Psychologie für Bachelor. Springer Berlin Heidelberg, 2011.

[128] G. Fechner, *Elemente der Psychophysik*, Serie Elemente der Psychophysik. Breitkopf und Härtel, 1860, Nr. Bd. 1.

[129] V. Potocny, „Charakterisierung Laserscheinwerfer," Mar. 2019, Praktikumsbericht.

[130] C. Panter, C. Sansone, C. Morf, und A. Panter, *The Sage Handbook of Methods in Social Psychology*, Serie The Sage handbook of. SAGE Publications, 2004.

[131] R. Solso, *Kognitive Psychologie*, Serie Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg, 2004. [Online]. Available: https://books.google.de/books?id=BBHGfU_TitwC

[132] T. Gocke, *Objektivierte Homogenitätsbewertung des Erscheinungsbildes automobiler Signalleuchten*. Der Andere Verlag, 2013.

# Tabellenverzeichnis

# Abbildungsverzeichnis

# A Anhang

## A.1. Probandenstudie

In Abbildung A.1 ist eine dunkle Inhomogenität im kleinsten Winkelbereich gezeigt. Das beleuchtete Feld entspricht der Region, in welcher alle Inhomogenitäten zufällig dargestellt werden und der Proband seinen Fokus richten soll. Abbildung A.2 zeigt den Fragebogen, welcher jedem Probanden gereicht wurde. Zusätzlich bekam jeder Proband die Versuchsdurchführung vorgelesen. Die Abfolge der präsentierten Inhomogenitäten ist für jeden Probanden individuell randomisiert worden und in Abbildung A.3 exemplarisch für den ersten Probanden gezeigt. Die Ergebnisse aller Probanden für den ersten Winkelbereich sind in Abbildung A.4 dargestellt. Hieraus kann abgeleitet werden, ob eine Inhomogenität in beiden Durchgängen von einer Testperson erkannt wurde oder nur einmalig. Ebenso ist hier vermerkt, wenn ein Proband eine Inhomogenität erkannt hat, obwohl keine dargestellt wurde (rote Einfärbung der Zelle).

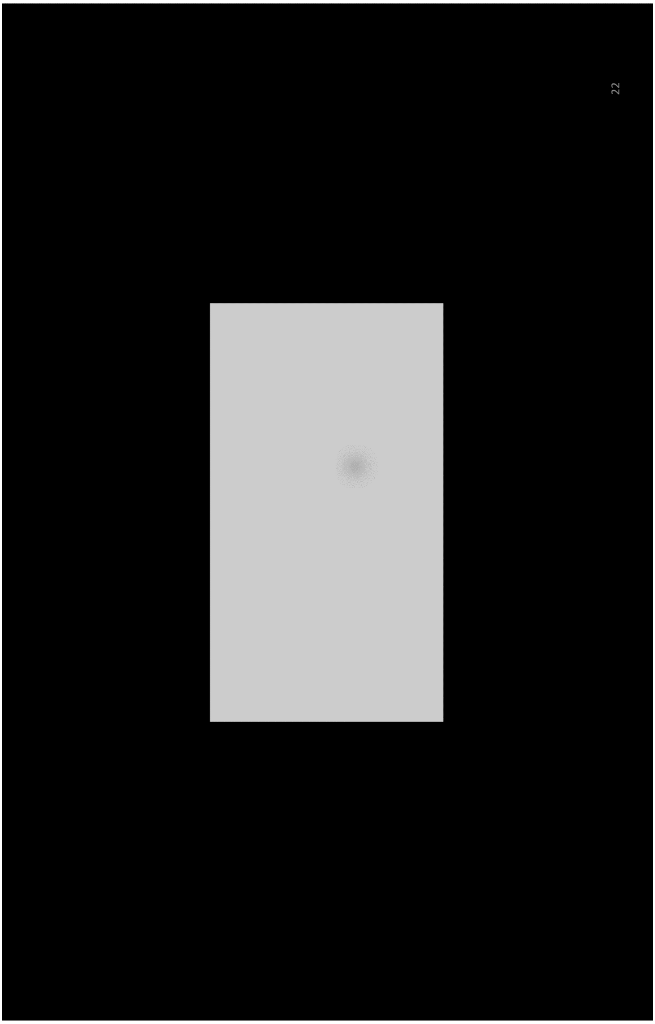


**Abbildung A.1.:** Bild, welches vom Beamer auf eine Leinwand projiziert wurde, welche der Proband in 10 m Entfernung betrachtet hat. 90° gedreht. Die Seitenzahl unten rechts diente der Zuordnung für den Versuchsleiter und war für den Probanden nicht zu sehen.

Audi AG - Standort Ingolstadt

Studie: Homogenitätsanalyse vom Vladimir Potocny und Philipp Ansorg

**PROBAND:** **1**

Versuchsdurchführung

Die Probandenstudie wird maximal 30 Minuten dauern.
Zuerst werden allgemeine Daten zur Ihrer Person aufgenommen, wobei die Angaben freiwillig sind.
Insgesamt werden 10 verschiedene Rechteck-Größen als Leuchtfläche dargestellt, jeweils 22 Inhomogenitäten pro Größe (nach jeder Folie wird ein schwarzer Hintergrund dargestellt, um die Ergebnisrelevanz zu erhöhen)
Intensität jeder Inhomogenität ist unterschiedlich und der Proband hat immer 2 Sekunden pro Folie Zeit, ob er/sie die Inhomogenität sieht oder nicht:
- falls JA - sagt er/sie "dunkel" oder "hell" (siehe Beispiel am Anfang der Studie)
- falls NEIN - sagt er/sie "keine"

Fragebogen

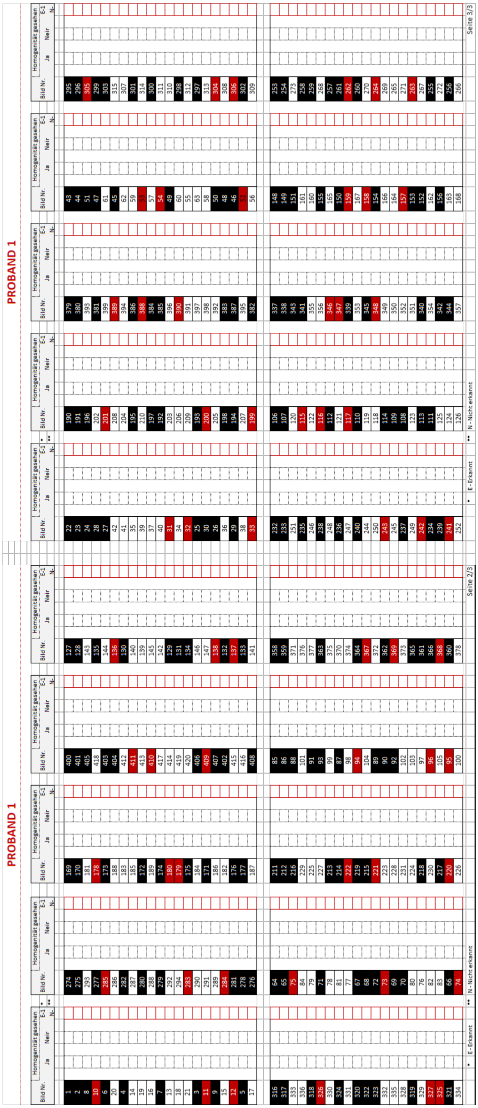
| 1. ALTER (in Jahre) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 18 - 27 | ☐ | 28 - 35 | ☐ | 36 - 43 | ☐ |
| 36 - 43 | ☐ | 44 - 52 | ☐ | 53 - 67 | ☐ |

| 2. GESCHLECHT | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| männlich | ☐ | weiblich | ☐ | diverse | ☐ |

| 3. SEEHILFE | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| keine | ☐ | Brille | ☐ | Kontaktlinsen | ☐ |
| | | jetzt getragen? | ☐ | jetzt getragen? | ☐ |

Seite 1/3

**Abbildung A.2.:** Fragebogen der Probandenstudie




PROBAND 1 (Seite 2/3)

| Bild Nr. | Bild Nr. | Bild Nr. | Bild Nr. | Bild Nr. |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 274 | 169 | 400 | 127 |
| 2 | 275 | 170 | 401 | 128 |
| 8 | 293 | 181 | 405 | 143 |
| 10 | 277 | 178 | 418 | 135 |
| 6 | 285 | 173 | 403 | 144 |
| 20 | 286 | 188 | 404 | 136 |
| 4 | 282 | 183 | 412 | 130 |
| 14 | 287 | 185 | 411 | 140 |
| 19 | 280 | 172 | 413 | 139 |
| 16 | 288 | 189 | 410 | 145 |
| 7 | 279 | 174 | 417 | 142 |
| 13 | 292 | 180 | 414 | 129 |
| 18 | 294 | 179 | 419 | 131 |
| 21 | 283 | 175 | 420 | 134 |
| 3 | 290 | 184 | 406 | 146 |
| 11 | 291 | 171 | 409 | 147 |
| 9 | 289 | 186 | 407 | 138 |
| 15 | 284 | 182 | 402 | 132 |
| 12 | 281 | 176 | 415 | 137 |
| 5 | 278 | 177 | 416 | 133 |
| 17 | 276 | 187 | 408 | 141 |
| 316 | 64 | 211 | 85 | 358 |
| 317 | 65 | 212 | 86 | 359 |
| 333 | 75 | 216 | 88 | 371 |
| 336 | 84 | 229 | 101 | 376 |
| 318 | 79 | 225 | 91 | 377 |
| 326 | 71 | 227 | 93 | 363 |
| 330 | 78 | 213 | 99 | 375 |
| 324 | 81 | 214 | 87 | 370 |
| 331 | 77 | 222 | 98 | 374 |
| 320 | 67 | 219 | 94 | 364 |
| 322 | 68 | 215 | 104 | 367 |
| 323 | 72 | 221 | 89 | 372 |
| 332 | 73 | 223 | 90 | 362 |
| 335 | 69 | 228 | 92 | 369 |
| 328 | 70 | 231 | 102 | 373 |
| 319 | 80 | 224 | 103 | 365 |
| 329 | 76 | 218 | 97 | 361 |
| 327 | 82 | 230 | 96 | 366 |
| 325 | 83 | 217 | 105 | 368 |
| 321 | 66 | 220 | 95 | 360 |
| 334 | 74 | 226 | 100 | 378 |

PROBAND 1 (Seite 3/3)

| Bild Nr. | Bild Nr. | Bild Nr. | Bild Nr. | Bild Nr. |
|---|---|---|---|---|
| 22 | 190 | 379 | 43 | 295 |
| 23 | 191 | 380 | 44 | 296 |
| 24 | 196 | 393 | 51 | 305 |
| 28 | 202 | 381 | 47 | 299 |
| 27 | 201 | 399 | 61 | 303 |
| 42 | 208 | 389 | 45 | 315 |
| 41 | 204 | 394 | 62 | 307 |
| 35 | 195 | 386 | 59 | 301 |
| 39 | 210 | 388 | 53 | 314 |
| 37 | 197 | 384 | 57 | 300 |
| 40 | 192 | 385 | 54 | 311 |
| 31 | 203 | 396 | 49 | 310 |
| 34 | 206 | 390 | 60 | 298 |
| 32 | 209 | 391 | 55 | 312 |
| 25 | 193 | 397 | 63 | 297 |
| 30 | 200 | 398 | 58 | 313 |
| 26 | 205 | 392 | 50 | 304 |
| 36 | 198 | 383 | 48 | 308 |
| 29 | 194 | 387 | 46 | 306 |
| 38 | 207 | 395 | 52 | 302 |
| 33 | 199 | 382 | 56 | 309 |
| 232 | 106 | 337 | 148 | 253 |
| 233 | 107 | 338 | 149 | 254 |
| 251 | 120 | 343 | 151 | 273 |
| 235 | 115 | 341 | 161 | 258 |
| 246 | 122 | 355 | 160 | 259 |
| 238 | 116 | 356 | 155 | 268 |
| 248 | 112 | 346 | 165 | 257 |
| 236 | 121 | 347 | 150 | 261 |
| 247 | 117 | 339 | 159 | 262 |
| 240 | 110 | 353 | 167 | 260 |
| 244 | 119 | 345 | 158 | 270 |
| 250 | 118 | 348 | 154 | 264 |
| 243 | 114 | 349 | 166 | 269 |
| 245 | 109 | 350 | 164 | 265 |
| 237 | 108 | 352 | 157 | 271 |
| 249 | 123 | 351 | 153 | 263 |
| 242 | 113 | 340 | 152 | 267 |
| 234 | 111 | 354 | 162 | 255 |
| 239 | 125 | 342 | 156 | 272 |
| 241 | 124 | 344 | 163 | 256 |
| 252 | 126 | 357 | 168 | 266 |

**Abbildung A.3.:** Tabelle der Reihenfolge aller dargestellten Reize exemplarisch für Proband 1. Der Versuchsleiter trägt die Antworten der Probanden ein, ob eine Inhomogenität erkannt und korrekt erkannt wurde.

| Größe | Nr. | I.H. | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 | P10 | P11 | P12 | P13 | P14 | P15 | P16 | P17 | P18 | P19 | P20 | P21 | P22 | P23 | P24 | P25 | P26 | P27 | P28 | P29 | P30 | P31 | P32 | P33 | P34 | P35 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 2 | 2 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 4 | 4 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 5 | 5 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| | 6 | 6 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | 7 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | 8 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 10 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1a | 11 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 12 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 13 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 14 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 15 | 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | 16 | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | 17 | 15 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 18 | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| | 19 | 17 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 20 | 18 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 21 | 19 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 22 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 23 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 24 | 3 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 25 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 26 | 5 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 27 | 6 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 28 | 7 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 29 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | 30 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | 31 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1b | 32 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 33 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 34 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| | 35 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 36 | 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | 37 | 14 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| | 38 | 15 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| | 39 | 16 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| | 40 | 17 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 41 | 18 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 42 | 19 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

**Abbildung A.4.:** Einzelergebnisse der Probandenstudie aller Probanden für den kleinsten dargestellten Winkelbereich. Die gelb markierten Zeilen entsprechen dem Nullreiz, bei dem keine Inhomogenität präsentiert wurde. In einem Fall wurde vom Probanden dennoch eine Inhomogenität als erkannt genannt (rot markierte Zelle).

## A.2. VERÖFFENTLICHUNGEN

ANSORG, P.: “Safety Concept for Future Laser Based Headlamp Systems“, 6th International LED professional Symposium+Expo, Vortrag, Bregenz, September 2016

ANSORG, P.; HAGER, J.; WOISETSCHLÄGER, O.; SEITZ, M.; ET AL.: “Advantages of laser scanners for automotive headlamps“, VISION - Vehicle and Infrastructure Safety Improvement in Adverse Conditions and Night Driving, Paris, Oktober 2016

HAGER, J.; SEITZ, M.; BEMMER, C.; JAHN, P.; ANSORG, P.; ET AL.: “Handling 17W of scanning laser power – three years of exploration in the iLaS project“, Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, September 2017

ANSORG, P.; HÖFER, B.; DANZ, N.; ZEITNER, U.: “Bending the Light with LCoS: ADB by Phase-modulated RGB Laser“, Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, September 2017

ANSORG, P.; HUHN, W.: “The Future of Automotive Lighting with Laser Technology“, The 7th Laser Display and Lighting Conference 2018, Yokohama, April 2018

ANSORG, P.: “The Future of Automotive Lighting with Semiconductor Technology“, electronica 2018, Vortrag, München, November 2018

ANSORG, P.; FISCHER, M.; MÖCKEL, C.; NEUMANN, C.: “Technologische und physiologische Bewertung eines hochaufgelösten Laserscanner-Scheinwerfersystems“, 8. VDI-Fachtagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik, Karlsruhe, Juni 2018

POPP, V.; ANSORG, P.; FLECK, B.; NEUMANN, C.: “Temporal coherence properties of laser modules used in headlamps determined by a michelson interferometer“, Advanced Optical Technologies, Vol.9, Nr.6, 2020

## A.3. BETREUTE ARBEITEN

ANNA MITTENHUBER: Aufbau und Inbetriebnahme eines Prüfstandes für Lasermodule von Kraftfahrzeugscheinwerfern. Bachelorarbeit, 2017.

ALEXANDER WOLF: Entwicklung von Lichtfunktionen für ein Laserscanner-Modul. Praktikum, 2017

ALEXANDER WOLF: Probandenstudie zur Untersuchung des visuellen Adaptionsverhaltens bei typischen Scheinwerferleuchtdichten. Bachelorarbeit, 2018

LUCAS WEBER: Praktikumsbericht zum Pflichtpraktikum in der Lichtentwicklung bei der AUDI AG. Praktikum, 2017

MARINA FISCHER: Homogenitätsbewertung eines dynamischen Laserscheinwerfer-Systems. Masterarbeit, 2017

VALERIE POPP: Temporal coherence properties of laser modules used in headlamps determined by a Michelson interferometer. Praktikum, 2017

THILO BRUNSCH: Simulative Betrachtung der Homogenität eines scannenden Laser-Scheinwerfersystems. Bachelorarbeit, 2018

JOHANNES WALTER: Charakterisierung des Lichtbildes von Scheinwerfersystemen bezüglich Homogenität. Bachelorarbeit, 2018

VLADIMIR POTOCNY: Charakterisierung Laserscheinwerfer. Praktikum, 2019

**SPEKTRUM DER LICHTTECHNIK**

Lichttechnisches Institut Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

ISSN 2195-1152

---

Band 1 Christian Jebas
**Physiologische Bewertung aktiver und passiver Lichtsysteme im Automobil.**
ISBN 978-3-86644-937-4

Band 2 Jan Bauer
**Effiziente und optimierte Darstellungen von Informationen auf Grafikanzeigen im Fahrzeug.**
ISBN 978-3-86644-961-9

Band 3 Christoph Kaiser
**Mikrowellenangeregte quecksilberfreie Hochdruckgasentladungslampen.**
ISBN 978-3-7315-0039-1

Band 4 Manfred Scholdt
**Temperaturbasierte Methoden zur Bestimmung der Lebensdauer und Stabilisierung von LEDs im System.**
ISBN 978-3-7315-0044-5

Band 5 André Domhardt
**Analytisches Design von Freiformoptiken für Punktlichtquellen.**
ISBN 978-3-7315-0054-4

Band 6 Franziska Herrmann
**Farbmessung an LED-Systemen.**
ISBN 978-3-7315-0173-2

Band 7 Simon Wendel
**Freiform-Optiken im Nahfeld von LEDs.**
ISBN 978-3-7315-0251-7

Band 8 Carmen Kettwich
**Ablenkung im Straßenverkehr und deren Einfluss auf das Fahrverhalten.**
ISBN 978-3-7315-0288-3

---

Die Bände sind unter www.ksp.kit.edu als PDF frei verfügbar oder als Druckausgabe bestellbar.

| | |
|---|---|
| Band 9 | Steffen Michenfelder<br>**Konzeption, Realisierung und Verifikation eines automobilen Forschungsscheinwerfers auf Basis von Digitalprojektoren.**<br>ISBN 978-3-7315-0301-9 |
| Band 10 | Celal Mohan Ögün<br>**Surface wave driven molecular low pressure plasmas for general lighting.**<br>ISBN 978-3-7315-0464-1 |
| Band 11 | Theresa Bonenberger<br>**LED Farbmischung mit chaotischen Lichtleitern.**<br>ISBN 978-3-7315-0480-1 |
| Band 12 | Michael Schöne<br>**Diffraktive Optiken im Automobil: Achromatisierung, Athermalisierung, Formung von Scheinwerferlichtverteilungen.**<br>ISBN 978-3-7315-0613-3 |
| Band 13 | Tobias Werner<br>**Simulation, Aufbau und Charakterisierung von autostereoskopischen Display-Systemen im Fahrzeugbereich.**<br>ISBN 978-3-7315-0617-1 |
| Band 14 | Christian Herbold<br>**Entwicklung und Herstellung naturähnlich verzweigter Kühlkörper für LED-Systeme.**<br>ISBN 978-3-7315-0635-5 |
| Band 15 | Carsten Gut<br>**Laserbasierte hochauflösende Pixellichtsysteme.**<br>ISBN 978-3-7315-0710-9 |
| Band 16 | Annie Shalom Samji Isaac Chandra<br>**Intelligent Freeform Deformation for LED Illumination Optics.**<br>ISBN 978-3-7315-0741-3 |

Band 17 Ingo Rotscholl
**Spectral near field data of LED systems for optical simulations.**
ISBN 978-3-7315-0750-5

Band 18 Inca Leopoldo Sayanca
**Sensorfusion zur Kompensation von Messfehlern bei kamerabasierter Farbverteilungsmessung.**
ISBN 978-3-7315-0830-4

Band 19 Benjamin Schulz
**Weiterentwicklung der Beleuchtungseinheit LED-basierter Projektionssysteme.**
ISBN 978-3-7315-0865-6

Band 20 Said Omerbegovic
**Prädiktive Lichtfunktionen für volladaptive Scheinwerfersysteme.**
ISBN 978-3-7315-0875-5

Band 21 Patric Jahn
**Bewertungsmodell zur Evaluation hochauflösender, lichtbasierter Fahrerassistenzsysteme.**
ISBN 978-3-7315-1009-3

Band 22 Maximilian Barthel
**Aufmerksamkeitslenkung mithilfe Innenraumbeleuchtung im Automobil.**
ISBN 978-3-7315-1011-6

Band 23 Melanie Helmer
**Methode zur Messung des Einflusses von Lichtimpulsen auf die visuelle Leistungsfähigkeit.**
ISBN 978-3-7315-1013-0

Band 24 Marina Budanow
**Entwicklung eines lichtbasierten Fahrerassistenzsystems.**
ISBN 978-3-7315-1018-5

Band 25 Dennis Zimmermann
**Verbesserung der Prozesskette zur Herstellung mikrostrukturierter Linsen für automobile Scheinwerfer.**
ISBN 978-3-7315-1058-1

Band 26 Manuel Trierweiler
**Detektion und Klassifizierung unterschiedlicher Bedeckungen auf Abschlussscheiben von LiDAR-Sensoren.**
ISBN 978-3-7315-1200-4

Band 27 Johannes Reschke
**Fahrerintentionserkennung zur lichtbasierten Kommunikation mit Fußgängern.**
ISBN 978-3-7315-1185-4

Band 28 Steffen Strebel
**Ein Beitrag zum simulationsbasierten Test von Lichtfunktionen.**
ISBN 978-3-7315-1208-0

Band 29 Fabian Stöger
**Lebensdauer von LED-Baugruppen.**
ISBN 978-3-7315-1218-9

Band 30 Maximilian Vogl
**Thermische Untersuchungen an Laser-aktivierten Leuchtstoff-Systemen mit dynamischer Leuchtdichteverteilung.**
ISBN 978-3-7315-1133-5

Band 31 Philipp Ansorg
**Technologische Beschreibung und physiologische Bewertung eines hochaufgelösten Laserscanner-Scheinwerfersystems.**
ISBN 978-3-7315-1291-2

Lichttechnisches Institut
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

SPEKTRUM DER LICHTTECHNIK

Beim Ansatz eines Laserscannerscheinwerfers zur Realisierung von adaptiven Lichtfunktionen werden sechs Laserdioden auf einen Mikrospiegel gelenkt, welcher durch seine schwingende Bewegung eine ausgedehnte Lichtverteilung auf einem Weißlichtkonverter erzeugt ehe diese auf die Fahrbahn projiziert wird. Diese Arbeit beschreibt diesen Ansatz und zeigt Methoden zur Homogenitätsbewertung von Scheinwerferlichtverteilungen.

ISBN 978-3-7315-1291-2

ISSN 2195-1152
ISBN 978-3-7315-1291-2

Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier